

# Portance des pieux en contexte carbonaté : le modèle FC2P de Polynésie

## Bearing capacity of piles in a calcareous context: the FC2P model from Polynesia

Moheatea LAUGHLIN<sup>1\*</sup>, Sébastien BURLON<sup>2\*\*</sup>

*1 Le Laboratoire des Travaux Publics de la Polynésie, Papeete, Polynésie française*

*2 Cerema – CEREMA – France*

\* moheatea.laughlin@gmail.com

\*\* *sebastien.burlon@cerema.fr*

**RESUME :** La Polynésie française est située au milieu de l’océan Pacifique où de nombreuses constructions se développent en contexte corallien. Ces terrains, encore peu documentés, ne sont pas intégrés aux normes en vigueur malgré leurs enjeux géotechniques élevés. Parmi ces enjeux, le dimensionnement des pieux métalliques battus, une solution courante de fondations en travaux maritimes, représente un défi considérable. Cet article porte sur l’étalonnage d’un modèle de calcul de la capacité portante des pieux tubulaires en acier, à partir de mesures issues d’essais pressiométriques Ménard réalisés dans les formations carbonatées de Polynésie française. Dans un premier temps, une revue bibliographique permet de caractériser ces formations carbonatées et de présenter le comportement des pieux qui y sont implantés. La méthodologie d’étalonnage utilisé afin de déterminer le modèle est ensuite décrite. Elle correspond à celle appliquée lors de l’élaboration de la norme française de conception des pieux (NF P 94-262), conforme à l’Eurocode 7. Par la suite, une base de données regroupant 34 essais de chargement sur pieux, réalisés par le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP), est analysée. A partir de ces données, un nouveau modèle de calcul dans les formations carbonatées de Polynésie FC2P est proposé, fondé sur l’étude de la dispersion des rapports entre les capacités calculées à partir des essais pressiométriques et celles mesurées lors des essais de chargement. Enfin, la qualité de l’étalonnage du modèle est présentée au travers d’une comparaison des dispersions obtenues avec l’ancien et le nouveau modèle

**ABSTRACT:** French Polynesia is located in the middle of the Pacific Ocean where many constructions are developing in a coral context. These lands, still poorly documented, are not integrated into the French standards despite their high geotechnical stakes. Among these issues, the design of driven steel piles, a common foundation solution in marine works, represents a considerable challenge. This article deals with the calibration of a model for calculating the bearing capacity of steel tubular piles, based Ménard pressiometric tests carried out in calcareous formations of French Polynesia. First, a bibliographical review allows to characterize these calcareous formations and to present the behavior of the piles that are implanted there. The calibration methodology used to determine the model is then described. It corresponds to the one applied during the development of the French standard for pile design (NF P 94-262), compliant with Eurocode 7. Subsequently, a database containing 34 loading tests on piles, carried out by the Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP), is analyzed. From these data, a new calculation model in the calcareous formations of Polynesia FC2P is proposed, based on the study of the dispersion of the ratios between the capacities calculated from pressiometric tests and those measured during loading tests. Finally, the quality of the model calibration is presented through a comparison of the dispersions obtained with the standard and new models.

**Mots-clés :** Travaux maritimes ; Fondations ; Formations carbonatées ; Portance ; Dimensionnement ; Contexte corallien ; Pieux.

### 1 INTRODUCTION

Au cours des dernières années, la Polynésie française a connu une croissance des besoins en matière de réhabilitation et de réalisation d’infrastructures maritimes. Cette dynamique a conduit à l’émergence de plusieurs projets d’aménagement portuaire sur Tahiti et ses îles, avec notamment la construction de

quais fondés sur pieux en acier battus et/ou vibrofoncés.

Durant les phases de travaux et d’exécution, les opérations de mise en place ainsi que les essais de contrôle des fondations ont mis en lumière des défauts de portance au sein des formations carbonatées. Les capacités calculées ne correspondaient nullement aux capacités réelles des sols en place, démontrant par ailleurs une inadéquation des normes françaises, plus

particulièrement de la NF P 94-262, avec les spécificités de ces terrains. Ces difficultés sont fréquentes dans les territoires ultramarins et il est indéniable que ces milieux ne sont pas suffisamment caractérisés.

En raison du contexte corallien rencontré en Polynésie française, il est essentiel, pour la profession géotechnique y compris les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises, de mieux comprendre ces formations et d'y ajuster les méthodes de dimensionnement.

Cet article, à l'initiative du Laboratoire Des Travaux Publics De Polynésie (LTPP), vise à présenter les mécanismes et phénomènes associés aux milieux carbonatés dans le cadre d'une revue bibliographique et proposer une première approche d'adaptation de la norme de dimensionnement des fondations profondes à ces milieux, notamment via l'étalonnage de coefficients empiriques impliqué dans la méthode de dimensionnement pressiométrique.

## 2 LES FORMATIONS CARBONATÉES DE POLYNÉSIE FRANÇAISE : TYPOLOGIE ET PROPRIETES GEOTECHNIQUES

Les formations carbonatées sont rencontrées dans de nombreux projets portuaires ou offshore, mais aussi terrestres. Elles se manifestent sous diverses formes (sols fins, sols pulvérulents ou grenues, formations indurées et roches). Ces formations d'origine sédimentaire sont majoritairement composées de minéraux carbonatés comme la calcite et l'aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ), ainsi que la dolomie ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Ces minéraux sont solubles dans l'eau et sont susceptibles d'agir comme des agents de cimentation. En effet, après leur dépôt ou leur construction, les sédiments carbonatés sont soumis à l'action complexe des phénomènes de consolidation sous leur propre poids et sous celui des dépôts ultérieurs, de dissolution et de cimentation des minéraux carbonatés qui les composent. La cimentation, plus spécifiquement, est l'ensemble des processus qui transforment un sédiment carbonaté meuble en une formation indurée. Au cours de la cimentation, la porosité tend à diminuer, et la précipitation de carbonates forme des cristaux à la surface des grains, augmentant la rigidité des formations. Cette cimentation peut être nodulaire ou continue, mais peut néanmoins être fracturée (AFNOR, 1988).

En Polynésie, les sédiments impliqués dans la création des formations carbonatées sont d'origine biogénique récente. Ils sont souvent non consolidés ou faiblement cimentés en raison de leur âge encore peu

avancé (absence de diagénèse contrairement à la craie ou la roche calcaire présente en métropole).

Communément et d'après les guides pratiques sur les ouvrages en mer (AFNOR, 1988), on reconnaît parmi ces formations, les sols pulvérulents carbonatés (voir 2.1), formations carbonatées à grains grossiers non cimentés ou à cimentation nodulaire ou discontinue, les sols fins carbonatés (voir 2.2) regroupant les limons et les argiles carbonatés non cimentés ou à cimentation nodulaire et les formations carbonatées cimentées (voir 2.3) contenant les formations carbonatées à grains grossiers ou fins et à cimentation continue.

### 2.1 Propriétés des sols pulvérulents carbonatés

La structure des sols pulvérulents carbonatés est aléatoire à cause d'une répartition granulométrique hétérogène et de grains à formes plus ou moins anguleuses selon leur taille (voir Figure 1) (Carter & Mortimer, 1988 & Alshibli et al., 2021).



Figure 1 : Photographie d'un échantillon de sol pulvérulent carbonaté

Ces sols sont caractérisés par un faible poids volumique sec des grains associé à une porosité intra-granulaire et un indice des vides élevé même après compactage (Carter & Mortimer, 1988 & Gao.Y et al., 2024).

Le comportement des formations grenues carbonatées est fragile. Il est principalement dû à leur haut potentiel d'écrasement (Carter & Mortimer, 1988). "L'écrasabilité" est définie par les recommandations du Comité Français de la Mécanique des Sols (CFMS) relatifs aux éoliennes offshore de 2020 comme la susceptibilité de rupture des grains de sols sous contrainte. Une récente étude a mis en lien la taille des grains et leur potentiel de fracture ; plus le grain est gros, plus il a de facilité à se briser (Li et al., 2024). Cet écrasement peut se produire sous de faibles contraintes et conduit à la perte progressive de résistance à la rupture de la formation et à sa densification (Carter & Mortimer, 1988 & Alshibli et al., 2021). De plus, à cause de leur porosité

élevée même après compactage ou écrasement, la résistance au cisaillement des sols pulvérulents carbonatés est plus faible que pour les formations grenues siliceuses sous une pression de confinement égale. Considérer un sol carbonaté comme un sol siliceux revient donc à surévaluer ses capacités. A noter que les matériaux carbonatés sont également sensibles à la saturation. Leur résistance diminue lorsqu'ils sont saturés. En effet, les pressions interstitielles augmentent, la matrice du sol subit une déstructuration et la contrainte effective du sol diminue (Carter & Mortimer, 1988).

Les matériaux pulvérulents carbonatés coquilliers et coralliens sont finalement souvent caractérisés par un indice de compressibilité mesuré lors d'essais oedométriques variant de 0,10 à 1,0 (Li et al., 2024). Leur compressibilité est déjà très variable mais associée au phénomène d'écrasement, un sol défini à grains grossiers durant les reconnaissances géotechniques peut facilement se retrouver avec le comportement d'un sol à grains fins du fait du broyage de ceux-ci sous un effort de compression ou sous l'action de la houle. La résistance à la rupture et la raideur des formations pulvérulentes peuvent donc diminuer par densification et écrasement de la structure carbonatée plutôt que par réorganisation des grains (Li et al., 2024).

## 2.2 Propriétés des sols fins carbonatés

Les matériaux carbonatés cohésifs (Figure 2) sont les formations carbonatées les moins caractérisées. Ces formations contiennent une fraction argileuse ou limoneuse carbonatées (composée principalement de calcite, d'aragonite ou de dolomite). Elles possèdent une haute sensibilité aux phénomènes de dissolution et de précipitation souvent rencontrés chez les carbonates et associés aux changements de chimie de l'eau (Carter & Mortimer, 1988). Son comportement est donc fluctuant et un changement de résistance peut être observé à la suite de ces phénomènes (modification des liens inter-particules). Un de ces phénomènes est connu sous le nom de **cicatrization**.



Figure 2 : Photographie d'un sol fin carbonaté

Comme les sables carbonatés, les matériaux cohésifs carbonatés possèdent des propriétés mécaniques plus faibles que les matériaux cohésifs siliceux, que ce soit en terme de plasticité ou de résistance au cisaillement (Carter & Mortimer, 1988).

Selon l'Association de Recherche en Géotechnique Marine (ARGEMA), les matériaux carbonatés cohésifs pourraient être appréhendés comme tous les sols cohérents et caractérisés grâce à leur cohésion non drainée. Cependant, celle-ci reste très variable d'une formation à une autre, variant de 25 kPa pour une formation molle à 200 kPa pour une formation compacte (AFNOR- Collection Guides pratiques sur les ouvrages en mer, 1988).

À l'heure actuelle, il est toujours nécessaire de mener des recherches supplémentaires pour caractériser ces formations.

## 2.3 Propriétés des formations carbonatées cimentées

Les formations carbonatées cimentées sont des roches partiellement ou fortement cimentées par des carbonates (calcite, dolomite). La composition minéralogique et le degré de cimentation sont variables au sein d'une même formation carbonatée. Cette fluctuation dans un même horizon conduit à une distribution hétérogène des capacités mécaniques et des raideurs du sol. Des zones « molles » peuvent par conséquent exister dans une formation continue, compliquant l'identification d'un modèle géotechnique précis (Carter & Mortimer, 1988).

Initialement, les formations carbonatées cimentées possèdent une résistance à la rupture élevée mais celle-ci peut très vite être dégradée sous chargement à cause du caractère fragile de la cimentation. En effet, lors de chargement cyclique ou dynamique, la cimentation peut être dégradée menant à de plus faibles résistances à long terme. Ainsi, il est montré que le degré et le type de cimentation participent grandement à la raideur de la formation.

Le phénomène d'**écrasement** des grains peut également être observé dans les formations cimentées. La mise en place de pieux par battage, par exemple, peut influencer sur la cimentation de la formation et entraîner la désolidarisation des grains et leur écrasement (Carter & Mortimer, 1988).

Enfin, il est intéressant de noter que les tests en laboratoire peinent à représenter la cimentation in situ de ces formations, mais aussi leur éventuelle modification par, par exemple, la mise en place de pieux. Ainsi, une caractérisation in situ est indispensable (Carter & Mortimer, 1988).

## 2.4 Comportement des pieux en acier dans les sols carbonatés : retours d'expérience

Les pieux en acier battus et/ou vibro-foncés constituent la pratique la plus courante et économique de fondations profondes en travaux maritimes. Leur comportement dans les formations carbonatées est étroitement lié à la compressibilité, la cimentation ou la cohésion de ces formations (Tirant et al., 1989).

Pour les sols pulvérulents carbonatés, la tendance des études indique que le frottement axial mobilisable pour les pieux battus décroît lorsque, l'indice de compressibilité limite CPI du matériau augmente. Dans les formations carbonatées cimentées, le frottement axial croît avec la résistance en compression simple du matériau et donc le degré de cimentation (Tirant et al., 1989). Quant aux sols fins carbonatés, le comportement des pieux en acier battus se rapprocherait de celui observé dans les sols cohérents et dépendrait de la cohésion non drainée CU du sol. Le frottement croît en fonction de ce paramètre (AFNOR, 1988).

Or, ces facteurs sont impactés par la mise en place des pieux par battage. En effet, lors du battage, un remaniement important intervient dans les terrains carbonatés au niveau de l'interface sol/pieu. Le battage fracture la cimentation existante et cause la rupture (l'écrasement) des particules carbonatées entraînant la création d'une pellicule "lubrifiée" autour du pieu. Cette reconfiguration du sol engendre une augmentation plus ou moins importante de la pression interstitielle et réduit, par la même occasion, les contraintes effectives responsables du frottement axial. Les efforts transitent alors du pieu vers les matériaux non remaniés via des éléments fracturés par effet de voûte. Toutes ces modifications conduisent finalement à une perte des capacités portantes du sol, notamment au travers d'une chute du frottement axial (Rausche & Hussein, 2000 & Babaroudj et al., 2024).

Les résistances perdues lors de l'installation des fondations peuvent néanmoins être partiellement regagnées grâce au **phénomène de cicatrisation** : les pressions interstitielles se dissipent au fil du temps et les grains se réarrangent. Malheureusement, ce phénomène n'est pas prédictible et est très aléatoire d'un pieu à l'autre sur une distance de quelques mètres.

Le frottement axial mobilisé dans la majorité des formations carbonatées est usuellement très faible. Dans les formations calcaires coralliennes, par exemple, les pieux battus ouverts ne permettent pas de mobiliser une capacité portante raisonnable à cause de leur caractère « carottent » et de la fragilité de la formation, et il est conseillé de se tourner vers des pieux en acier battus fermés afin de compenser cette

perte de frottement axial en augmentant le terme de pointe (Rausche & Hussein, 2000). Dans les sables carbonatés, également, le frottement mobilisé peut être tellement faible qu'il est possible de faire face au **phénomène de "chute libre"**. Sous quelques coups de marteau ou de son propre poids, le pieu peut couler dans le sol. Ce phénomène est d'autant plus brutal que la couche de sable est précédée d'un "cap rock", couche plus cimentée (AFNOR, 1988).

La mise en place de pieux tubulaires métallique à base ouverte peut également s'accompagner de mécanismes de pointe décrits sous le nom de **phénomènes bouchonnant et carottant** (Babaroudj et al., 2024).

Le **phénomène bouchonnant** se produit lorsque le terrain ne rentre plus totalement dans le pieu. Selon cette configuration, les frottements entre le terrain à l'intérieur du tube et le tube sont suffisants pour équilibrer une réaction à la base du pieu. Ce phénomène permet alors à un pieu battu ouvert, de bouchonner et de se rapprocher du fonctionnement d'un pieu battu fermé (Brucy, 1991 & Combarieu, 1999).

Le **phénomène carottant** correspond à une situation où tout le terrain traversé rentre dans le pieu. Le cas carottant indique alors que la résistance de pointe du pieu est très faible : les frottements entre le terrain à l'intérieur du tube et le tube sont trop faibles pour équilibrer toute réaction à la base du pieu.

Il n'est pas commun que ce soit l'effet bouchon qui intervienne plutôt que l'effet carottant dans les formations carbonatées. Les pieux en acier battus ouverts ne justifient donc souvent pas de terme de pointe (Rausche & Hussein, 2000).

## 3 ÉTALONAGE DU MODELE FC2P

Dans le but de définir des coefficients empiriques propres aux formations carbonatées, une base de données est constituée à partir des archives du LTPP et analysée selon la méthodologie d'étalonnage suivie lors de l'élaboration de la norme NF P 94-262 (Baguelin et al., 2012, Burlon et al., 2014). Elle a permis l'établissement d'un modèle de calcul spécifique aux Formations Carbonatées de Polynésie pour les Pieux (FC2P) battus ouverts.

Parmi ces archives, il est identifié et analysé les résultats de 34 essais de chargement sur pieux :

- 14 essais de chargement statique (10 essais en compression uniquement et 4 essais en compression et en traction) ;
- 7 essais de chargement dynamique de type SIMBAT ;

- 13 essais de chargement statique simplifié en compression.

Au travers de ces essais, 14 pieux métalliques battus fermés (BAF de classe 4-catégorie 12 au sens de la NF P 94 262 de 2012) et 20 pieux métalliques battus ouverts (BAO de classe 5-catégorie 13 au sens de la NF P 94 262 de 2012), possédant des diamètres variant de 326 à 1220 mm et des fiches variables entre 6 et 46,2 m, sont étudiées. Lors de ces essais, les charges limites maximales et minimales mesurées sont de 5700 kN et 150 kN, respectivement.

Pour chaque pieu investigué, un sondage pressiométrique a été réalisé.

Deux types de sols sont reconnus, les sols fins carbonatés et les sols pulvérulents carbonatés. Il est mesuré dans ces sols des pressions limites nettes  $p_l^*$  variant de 100 kPa à 3400 kPa. Le Tableau 1 précise la répartition des différents essais en fonction du type de pieu et du type de sol situé sous la base de la fondation.

Tableau 1 : Répartitions des essais par type de sol en pointe et type de pieu selon la NF P 94-262

Type de sol	Type de pieu		Total	$p_{l,max}^*$ (kPa)	$p_{l,min}^*$ (kPa)
	BAF	BAO			
Sols fins carbonatés	2	9	11	1800	170
Sols pulvérulents carbonatés	12	11	23	3400	<100

### 3.1 Méthodes d'étalonnage

La méthode de dimensionnement pressiométrique des fondations profondes, décrite dans la NF P 94-262, représente le modèle à l'étude. Cette méthode de calcul se base sur les résultats d'essais pressiométriques, en particulier sur la pression limite  $p_l^*$  mesurée pour un sol donné. À partir de cette charge limite pressiométrique, des corrélations sont réalisées afin de déterminer des valeurs de résistance unitaire de pointe  $qb$  et de frottement  $qs$ . Chacun de ces termes est défini comme suit :

$$q_b = k_p P_{le}^* \quad (1)$$

$$q_{s;i} = \alpha_{pieu-sol} f_{sol}(P_{IM}^*) \quad (2)$$

$$f_{sol}(p_{IM}^*) = \min((a * (p_l^*) + b)(1 - e^{(-c*(p_l^*))}); q_{s,max}) \quad (3)$$

$p_{le}^*$  est la pression limite équivalente et correspond à la moyenne géométrique des valeurs  $p_l^*$  pour une couche géologique donnée.  $f_{sol}(p_{IM}^*)$ ,  $k_p$  et  $\alpha_{pieu-sol}$  sont les coefficients empiriques à étalonner dans le cadre de ce projet.

La démarche d'étalonnage vise à ajuster le modèle de calcul présenté ci-dessus afin de limiter les écarts entre les valeurs calculées et les données mesurées en s'appuyant sur l'interprétation d'une courbe de distribution cumulative  $X_{calculée}/X_{mesurée}$ . Dans le contexte de cette étude, chaque essai de chargement apporte des valeurs mesurées et chaque sondage pressiométrique permet l'estimation des valeurs calculées.

Il a été choisi de réaliser une étude statistique sur une courbe de distribution cumulative car elle permet de représenter visuellement la précision du modèle de calcul et de quantifier la dispersion des résultats. Plusieurs indicateurs provenant de cette courbe peuvent être interprétés dans le but d'estimer la qualité de l'étalonnage :

- la moyenne ;
- la médiane ;
- le fractile à 85 % ;
- l'écart-type.

La **moyenne** permet d'évaluer le taux moyen de surévaluation ou de sous-évaluation. La **médiane** indique où se situe l'équilibre de prédiction du modèle. Le **fractile à 85 %** représente la valeur en dessous de laquelle se trouvent 85 % des rapports  $X_{calculée}/X_{mesurée}$  ; il renseigne ainsi sur le niveau d'estimation présent dans la majorité des cas. Enfin, l'**écart-type** reflète l'étalement des résultats autour de la moyenne, c'est-à-dire la variabilité des estimations du modèle.

En pratique et pour monter un modèle au plus proche de la réalité, chaque paramètre empirique de la méthode pressiométrique est étalonné successivement. Dans un premier temps, un calage global est réalisé. La variation de  $qb$  en fonction de  $k_p$  est ensuite étudiée. Puis la variation de  $qs$  est analysée en fonction de  $q_{s,max}$ , de  $f_{sol}(P_{IM}^*)$  puis de  $\alpha_{pieu-sol}$ . Ces paramètres sont fonction du sol mais sont également associés à un type de pieux.

Pour permettre une comparaison entre le modèle calibré et non calibré, il est considéré que les sols pulvérulents carbonatés correspondent, entre autres, aux sols intermédiaires de type sable et graves au sens de la NF P 94-262 et que les sols fins carbonatés sont associés aux sols intermédiaires de types limons au sens de cette même norme. Cette association est celle actuellement réalisée lors des dimensionnements de pieux en Polynésie.

### 3.2 Coefficients empiriques étalonnés : présentation et analyse

La présente campagne d'étalonnage, permet de proposer une série de coefficients empiriques étalonnés spécifiquement pour les formations carbonatées rencontrées en Polynésie française.

La présente section détaille les valeurs retenues pour ces coefficients

### 3.2.1 Valeurs de $k_p$

Le Tableau 2 récapitule les valeurs retenues pour le facteur de portance. Il présente également les valeurs proposées actuellement par la norme de dimensionnement des fondations profondes.

Tableau 2 : Valeurs de  $k_p$  en fonction du type pieux et sols

	Type de pieux	FC2P	NF P 94-262
<b>Sols fins carbonatés</b>	BAO-B	0,06	1
	BAF-B	1,3	1,35
<b>Sols pulvérulents carbonatés</b>	BAO-B	0,06	1,9
	BAO-V	0,06	0,95
	BAF-B	1,3	3,1

Pour les pieux en acier ouvert, battus dans les formations carbonatées, les facteurs de portance sont plus faibles. Cela peut être dû au phénomène carottant en pointe. En effet, il est fréquent qu'aucun bouchon ne se forme pour ce type de pieux dans ce type de sol, la capacité de pointe est donc réduite. Les propriétés mécaniques plus faibles des matériaux carbonatés jouent également un rôle important. Enfin, il semble que les facteurs de portance soient davantage restreints dans les sols pulvérulents carbonatés. Il est possible d'énoncer l'hypothèse que les phénomènes d'écrasement et de densification des grains sont prépondérants. Le battage sectionne les liaisons entre grains, dégradant ainsi les capacités du milieu.

Du côté des pieux battus fermés dans les matériaux fins carbonatés, le facteur de portance ne varie que très peu avant et après étalonnage. Cette faible diminution après étalonnage peut tout simplement être due aux capacités plus faibles des sols fins carbonatés par rapport aux autres types de sols fins.

### 3.2.2 Valeurs de $q_{smax}$ , $f_{sol}$ et $\alpha_{pieu,sol}$

Les paramètres concernant le frottement axial ont globalement diminué, reflétant une réduction des résistances au frottement mobilisées.

Tableau 3 : Valeurs retenues pour  $Q_{smax}$  et  $\alpha_{pieu,sol}$

BAO	BAO	BAF
Q1	Q2	Q3
Sols fins carbonatés	Sols pulvérulents carbonatés	Sols pulvérulents carbonatés

$\alpha_{pieu,so}$	0,8	0,6	0,7
$q_{smax}$ (kPa)	55	10	12

Les valeurs de frottement axial maximales dans les formations carbonatées sont faibles (voir Tableau 3). En effet, elles sont limitées à 55 kPa dans les sols fins carbonatés et réduites à un intervalle de 10 à 12 kPa dans les sols pulvérulents. Cette minoration est particulièrement importante dans les sols pulvérulents, en raison de l'absence quasi totale de cohésion. L'hypothèse de la sensibilité à l'écrasement des grains de cette formation peut également être posée. À l'inverse, les sols fins sont moins affectés bien que leur comportement mécanique reste conditionné par une teneur élevée en carbonates, la présence d'une cohésion plus ou moins forte permet de limiter la perte de résistance latérale.

Le coefficient  $\alpha_{pieu,sol}$  rend compte de la nature de l'interface entre le pieux et le sol. Celui-ci est modéré et représente une interface plutôt lisse. Ce manque d'adhérence pourrait être exacerbé par le phénomène d'écrasement des grains carbonatés constituant une pellicule « lubrifiée » autour des pieux. Cependant, il pourrait également être contré par le phénomène de cicatrisation.

Finalement, les fonctions  $f_{sol}$  retenues sont celles présentées sur la Figure 3 et le Tableau 4. Ces fonctions présentent une pente initiale raide dans les sols fins carbonatés, indiquant une mobilisation rapide du frottement le long du fût, et modérée dans les formations pulvérulentes carbonatées, indiquant une mobilisation douce du frottement le long du fût. Cependant, elles atteignent rapidement un plateau de stabilisation, avec des valeurs de  $q_{smax}$  plus faibles que celles préconisées par la norme française et un coefficient  $c$  élevé. Enfin, on note la quasi-absence de frottement résiduel.

Tableau 4 : Paramètres retenues pour les fonctions  $f_{sol}$

	BAO	BAO	BAF
	Q1	Q2	Q3
fsol	Sols fins carbonatés	Sols pulvérulents carbonatés	Sols pulvérulents carbonatés
a	0,07	0,007	0,015
b	0,06	0,03	0,05
c	1,5	3,5	2,5

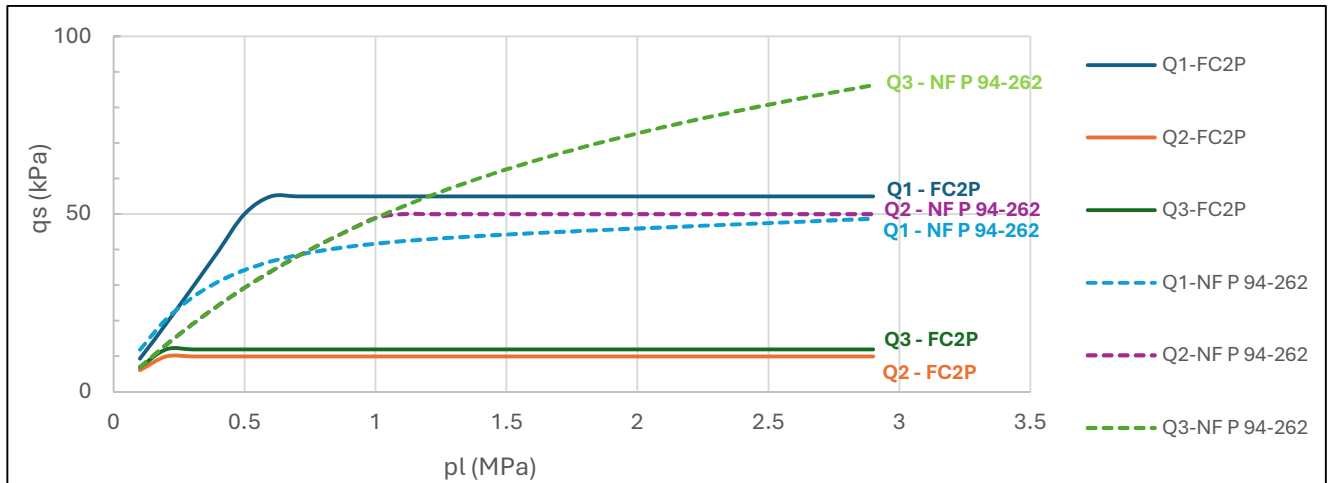


Figure 3 : Variation des valeurs du frottement axial en fonction des pressions limites  $pl^*$

### 3.3 Le modèle FC2P et la NF P 94-262

Cette section présente une comparaison des dispersions obtenues avec l'ancien et le nouveau modèle.

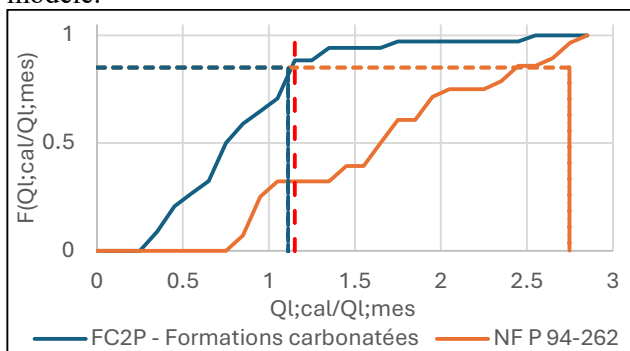


Figure 4 : Courbe de distribution globale de  $Q_{l;cal}/Q_{l;mes}$

Tableau 5 : Synthèse des indicateurs  $Q_{l;cal}/Q_{l;mes}$  analysés

	FC2P	NF P 94 262
<b>Moyenne</b>	0,74	1,76
<b>Médiane</b>	0,75	1,68
<b>Fractile à 85%</b>	1,11	2,75
<b>Ecart type</b>	0,43	1,59

La Figure 4 présente les courbes de distribution  $Q_{l;cal}/Q_{l;mes}$  avant étalonnage (courbe orange) et après étalonnage (courbe bleue).

La méthode actuelle, non étalonnée, telle que décrite dans la norme NF P 94-262, présente une forte dispersion lorsqu'elle est appliquée aux sols à forte teneur en carbonates présents en Polynésie. Elle entraîne une surestimation moyenne des résistances du sol pouvant atteindre 76 %. En comparaison, le modèle FC2P résulte en une sous-évaluation moyenne de 26 %. Cette sous-estimation reflète une tendance inverse mais plus modérée, également observée à travers les valeurs médianes. Dans 50 % des cas, le modèle classique surestime de 68 % les capacités contre une sous-estimation de 25 % après étalonnage.

Toutefois, le fractile à 85 % montre que dans 85 % des cas, la méthode étalonnée surestime les résultats de 11 % au maximum, contre 175 % pour la méthode actuelle appliquée aux formations carbonatées. Cela démontre que le modèle ajusté reste globalement conservatif et sécuritaire.

Enfin, il est observé un écart-type de 0,43 pour le modèle FC2P. Celui-ci reflète une dispersion modérée des rapports. En revanche, l'écart-type de 1,59 obtenu avec la méthode non étalonnée souligne les inadéquations de la méthode aux formations carbonatées.

L'analyse globale des rapports entre les résistances calculées  $Q_{l;cal}$  et les résistances mesurées  $Q_{l;mes}$  permet d'apprécier l'écart mis en évidence en Figure 4 entre la méthode pressiométrique FC2P pour les formations carbonatées et la méthode classique définie dans la norme NF P 94-262. Ces résultats confirment les observations faites lors de la phase chantier et soulignent l'incompatibilité des méthodes de dimensionnement actuelles aux formations carbonatées en Polynésie.

Typiquement, il a pu être comparé des valeurs théoriques de frottement latéral calculées sur la base de la NF P 94-262, 4 à 7 fois supérieures à celles mesurées sur le terrain au cours d'essais de chargement statique.

De façon similaire, l'analyse des rapports  $Q_c;cal/Q_c;mes$  met en évidence une tendance marquée à la surestimation des capacités calculées selon la norme.

Tableau 6 : Synthèse des indicateurs  $Q_c;cal/Q_c;mes$  analysés

	FC2P	NF P 94 262
<b>Moyenne</b>	0,83	2,12
<b>Médiane</b>	0,77	1,68
<b>Fractile à 85%</b>	1,30	4,66
<b>Ecart type</b>	0,70	3,87

## 4 CONCLUSION

En conclusion, les données disponibles ont démontré que le modèle classique développé dans la norme actuelle NF P 94\_262, n'est pas adapté aux formations carbonatées. En pratique, il conduit à une surestimation importante de la capacité portante du sol. Il est, par conséquent, nécessaire de calibrer les coefficients empiriques pour tenir compte des spécificités de ces formations.

Le modèle proposé se veut très conservatif et sécuritaire. Toutefois, au regard de la complexité des phénomènes associés aux sols carbonatés, il offre un large potentiel d'évolution.

Globalement, pour les données d'entrée considérées, on observe une sous-estimation de l'ordre de 20 %, une valeur acceptable dans le contexte de constructions sensibles en contexte réputé hétérogène avec de fortes variations latérales.

Par ailleurs, d'autres sols présents en Polynésie, tels que les « *mamu* » (produits d'altération et de fragmentations de roches basaltiques) présentent également des caractéristiques particulières. À ce jour, aucune problématique majeure n'a été identifiée dans ces formations au niveau des couches profondes. Cependant, à la vue de leurs particularités, il pourrait être judicieux de s'y intéresser.

## REMERCIEMENTS

Le projet présenté dans cet article est soutenu par Le Laboratoire des Travaux Publics de la Polynésie.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alshibli, K. A., Jorat, M. E., & Al-Jaberi, M. (2021). Physical and mechanical properties of calcareous soils: A review, *Marine Georesources & Geotechnology*, 40(2), pp. 117–142. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2021.1937542>
- Argema (1988). Capacité portante des pieux, 1<sup>re</sup> éd., Éditions TECHNIP, Paris, France. ISBN 2-7108-0536-7.
- Argema (1988). Pieux dans les formations carbonatées, 1<sup>re</sup> éd., Éditions TECHNIP, Paris, France. ISBN 2-7108-0551-0.
- Babaroudj, Z., Brun, M., Charruault, A., & Burlon, S. (2024). Quelques retours d'expérience concernant les pieux battus ouverts de grande dimension, dans : *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Poitiers 2024*, pp. 1–8.
- Baguelin, F., Bustamante, M., Burlon, S., Frank, L., Gianeselli, R., Habert, J. et Legrand, S. (2012). Justification de la portance des pieux avec la norme « fondations profonde » NF P 94-262 et le pressiomètre. *JNGG.*, Bordeaux 2012, 564–577
- Burlon, S., Frank, R., Baguelin, F., Habert, J. and Legrand, S. (2014) Model factor for the bearing capacity of piles from pressuremeter test results A Eurocode 7 approach. *Géotechnique*, 64(7), 513–525.
- Carter, J. P., & Mortimer, J. (1988). A review of laboratory testing of calcareous soils, *Marine Georesources & Geotechnology*, 7(3), pp. 225–263. <https://doi.org/10.1080/10641198809388244>
- Combarieu, O. (1999). Estimation du frottement latéral sol–pieu à partir du pressiomètre et des caractéristiques de cisaillement, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 221, pp. 37–54.
- Gao, Y., Guo, Z., & Yuan, Q. (2024). Pile Driving and the Setup Effect and Underlying Mechanism for Different Pile Types in Calcareous Sand Foundations, *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, article 133, pp. 1–16. [En ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/> Consulté le : 17/04/2025.
- Groupe de Travail « Fondations d'éoliennes offshore » (2020). *Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore*, 2<sup>e</sup> éd., Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique, Paris, France.
- Li, Z., Zhang, B., Lu, Y., Chen, X., Wu, Y., Luo, M., & Zhong, L. (2024). Particle breakage characteristics of calcareous sand under confined compression tests, *Scientific Reports*. [En ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.nature.com/> Consulté le : 16/04/2025.
- Liu, Y., Dijkstra, J., Jardine, R. J., & Gavin, K. (2024). Effects of cyclic loading on the tensile capacity of plate anchors in carbonate soils, dans : *Proceedings of the 18th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE)*, Lisbonne, Portugal, pp. 1–6.
- Rausche, F., & Hussein, M. (2000). Pile driving in calcareous sediments, dans : *Engineering for Calcareous Sediments*, 1<sup>re</sup> éd., Balkema, Rotterdam, Pays-Bas, pp. 345–359.
- Tirant, R. L., Nauroy, J.-F., Brucy, F., & Montarges, R. (1989). Fondations des ouvrages en mer dans les formations carbonatées, dans : *Actes du 12<sup>e</sup> Congrès international de mécanique des sols et de géotechnique*, Rio de Janeiro, Brésil, pp. 99–102.