

# fonçage et vibrations

par

**J. G. Siéffert**

E. N. S. M., Nantes

**Y. Riou**

E. N. S. M., Nantes

**RESUME** - Dans cette étude, les auteurs présentent l'essentiel des résultats expérimentaux obtenus en laboratoire au cours de vibrofonçages à fréquence élevée. L'analyse du bilan énergétique suivant la fréquence d'excitation dans le cas d'une palplanche met en évidence l'intérêt d'utiliser une fréquence de résonance correspondant à un ventre de vibration en tête. Des essais comparatifs entre un pieu et une palplanche ainsi que la mesure de la force de pointe dans le cas du pieu permettant d'expliquer les différences d'allure des courbes de fonçage et d'énergies fournies par un transfert plus rapide de la force de pointe à la force de frottement latéral pour la palplanche que pour le pieu.

## INTRODUCTION

Le fonçage dynamique des pieux et des palplanches est habituellement réalisé sur chantier soit par battage, soit par vibration à basse fréquence (quelques dizaines de Hertz au maximum). Pour sa part, le laboratoire de Génie Civil de l'E.N.S.M. a développé un procédé original utilisant des vibrations à fréquence élevée (1500 à 3000 Hz) fournies par un excitateur électromagnétique. Une expérimentation systématique en laboratoire menée par SIEFFERT (1974) a mis en évidence la possibilité d'obtenir des enfoncements efficaces par cette méthode à condition d'utiliser l'une des fréquences de résonance du système exciteur-pieu. Les travaux du même auteur concernant aussi bien l'analyse de l'influence de l'amortissement interne du pieu (1978) que l'étude théorique et expérimentale du cas particulier de la vitesse d'enfoncement nulle (1980) ont permis de conclure que parmi toutes les fréquences possibles, celle qui correspond à un ventre de vibration en tête de pieu devrait s'avérer la plus efficace.

L'objet de cette étude est de présenter l'essentiel des résultats expérimentaux relatifs aux puissances et aux énergies fournies à une palplanche et à un pieu dans le cas d'une vitesse d'enfoncement non nulle. On analysera en particulier deux aspects du problème : d'une part la comparaison du bilan énergétique suivant la fréquence d'excitation dans le cas de la palplanche, et d'autre part la différence de comportement entre le pieu et la palplanche. Le rappel des principaux résultats théoriques permettra de confronter l'expérience à la théorie.

## PRINCIPAUX RESULTATS THEORIQUES

Il n'est pas de notre propos d'exposer ici les développements mathématiques et l'ensemble des résultats théoriques qui en découlent et qui ont déjà été présentés par ailleurs par SIEFFERT (1980). Nous nous contenterons de rappeler les points essentiels.

La plus importante des hypothèses concerne le frottement latéral supposé du type sec. Les essais de fonçage ont été réalisés dans du sable sec qui est un matériau purement frottant. Il nous semble que c'est donc l'hypothèse la mieux adaptée aux caractéristiques du sol utilisé.

La forme de la solution se prête particulièrement bien à une résolution par ordinateur. Les résultats, dont nous ne présentons ici que l'aspect qualitatif, ont été obtenus en utilisant les valeurs numériques correspondant au matériel d'essai et qui sont précisées au paragraphe "dispositif expérimental". Dans le domaine de fréquence retenu, le système exciteur-palplanche possède deux fréquences de résonance  $N_2 = 1895$  Hz et

$N_3 = 2716$  Hz auxquelles il correspond respectivement quasiment un ventre et un noeud de vibration en tête de la palplanche.

### Puissance dissipée par le frottement latéral

Le principal résultat concerne le rapport des puissances dissipées par le frottement latéral aux deux fréquences. Pour une même valeur des paramètres (fiche, vitesse de

fonçage, coefficient de frottement sol-palplanche) la puissance dissipée par le frottement latéral à la fréquence  $N_3$  est toujours plus de cinq fois plus grande que celle dissipée à la fréquence  $N_2$ . Comme cette

puissance dissipée n'est autre que celle transmise au sol par la palplanche, on peut donc s'attendre a priori à ce que le coefficient de frottement sol-palplanche soit inférieur à  $N_3$  qu'à  $N_2$ , ce qui doit se traduire par un enfoncement plus rapide à 2716 Hz qu'à 1895 Hz pour un même niveau d'excitation.

#### Puissance fournie par l'excitateur à la palplanche

La puissance fournie par l'excitateur à la palplanche est celle mesurée expérimentalement. Les résultats théoriques montrent que d'une part elle est une fonction décroissante de la vitesse et que d'autre part elle évolue entre deux courbes limites correspondant à la vitesse nulle pour la borne inférieure et à la vitesse limite pour la borne supérieure. Ce dernier cas est obtenu lorsque la vitesse d'enfoncement est égale à la plus grande vitesse de déformation que peut présenter la palplanche (vitesse de déformation de la pointe en l'absence de sol).

#### DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Avant de présenter les résultats des essais, on peut rappeler brièvement les principales caractéristiques du dispositif expérimental déjà décrit par ailleurs par SIEFFERT (1980).

L'excitateur de type électromagnétique comporte deux séries de bobines. Les unes sont alimentées en courant continu d'intensité  $I_C$  fournie par une alimentation stabilisée et les autres en courant alternatif d'intensité  $I_A$  délivrée par un amplificateur de puissance piloté par un générateur de fonctions à fréquence réglable. Les intensités, et par conséquent l'amplitude de la force d'excitation, sont maintenues constantes au cours de chaque essai. La masse totale de l'excitateur est de 8,5 kg.

La palplanche est une tôle d'acier. Le pieu est un tube fermé à son extrémité inférieure par un cône de  $120^\circ$ . L'essentiel des caractéristiques de ces éléments est rassemblé dans le tableau.

La palplanche et le pieu sont fixés à l'excitateur par l'intermédiaire d'un capteur de force piézo-électrique permettant de mesurer l'amplitude  $F_f$  de la force appliquée par l'excitateur à la palplanche ou au pieu, ainsi que sa phase  $\phi_F$ . L'amplitude  $\gamma$  et la phase  $\phi_\gamma$  de l'accélération de la section supérieure de la palplanche sont données par

un accéléromètre également du type piézo-électrique.

Caractéristiques	Palplanche	Pieu
Masse	2,3 kg	7,1 kg
Longueur	200 cm	176 cm
Périmètre	300 mm	110 mm
Section d'acier	150 mm <sup>2</sup>	518 mm <sup>2</sup>
Section transversale	150 mm <sup>2</sup>	980 mm <sup>2</sup>

La puissance  $P_f$  fournie par l'excitateur à la palplanche ou au pieu se calcule par la relation (1)

$$P_f = \frac{F_f \gamma}{4 \pi N} \sin(\phi_\gamma - \phi_F) \quad (1)$$

L'énergie  $E_f$  fournie par l'excitateur à la palplanche ou au pieu s'obtient à partir de  $P_f$  et de l'enregistrement de la fiche en fonction du temps. Tous les essais ont été réalisés dans du sable de Loire sec, de densité moyenne 1,60, contenu dans une cuve de 0,98 m de diamètre et de 2,75 m de hauteur utile. Le niveau d'excitation est identique pour tous les essais dont nous présentons les résultats ici.

#### RESULTATS DES ESSAIS

Dans le domaine de fréquences qui nous intéresse, les fréquences de résonance expérimentales sont  $N_2 = 1866$  Hz et  $N_3 = 2678$  Hz. L'écart relatif par rapport aux fréquences calculées est d'environ 1,5 %.

#### Puissances fournies à la palplanche

La figure 1 présente un exemple de l'évolution de la puissance fournie en fonction de la vitesse.

Ces courbes vérifient les deux points essentiels soulignés dans la présentation des résultats théoriques :

- Pour une même vitesse, la puissance fournie à la fréquence correspondant à un ventre de vibration en tête est toujours supérieure à celle fournie à la fréquence correspondant à un noeud de vibration.

- Pour les deux fréquences, la puissance fournie est une fonction décroissante de la vitesse. Ceci s'explique par le fait que les forces de frottement augmentent avec la vitesse et donc contribuent à diminuer les amplitudes de vibration et par conséquent les termes  $F_f$  et  $\gamma$  de l'équation (1).

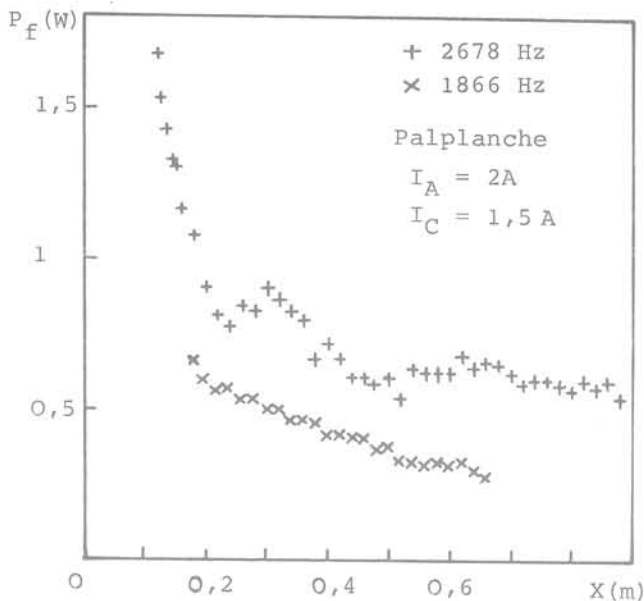


Fig. 1 - Puissance fournie.

Les irrégularités que l'on relève sur les courbes principalement à la fréquence  $N_3$  peuvent être imputées à des variations même faibles de la densité du sol. Il est en effet très difficile d'obtenir une densité parfaitement identique en tout point de la cuve.

#### Energies fournies à la palplanche

La figure 2 présente l'évolution de l'énergie fournie à la palplanche en fonction de la fiche.

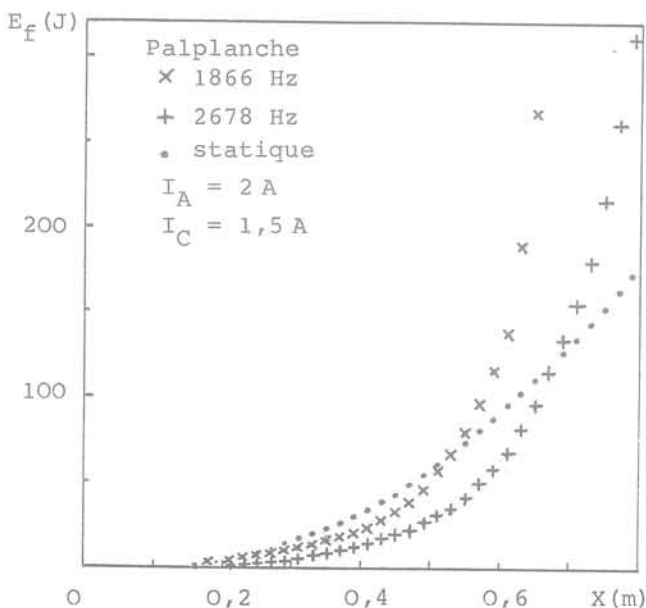


Fig. 2 - Energie fournie.

On constate bien entendu que l'énergie fournie est une fonction croissante de la fiche. De plus, les courbes possèdent une asymptote verticale correspondant au refus. En effet, à la fin du fonçage, l'énergie fournie sert uniquement à entretenir les oscillations dans le système exciteur-palplanche sans qu'aucun enfoncement ne puisse plus être obtenu. Cette asymptote correspond à une fiche plus faible à  $N_2$  qu'à  $N_3$ .

On relève d'autre part que l'énergie à fournir pour obtenir une fiche donnée est systématiquement inférieure à la fréquence  $N_3$  qu'à la fréquence  $N_2$ . Comme en plus la vitesse d'enfoncement est plus grande à  $N_3$  qu'à  $N_2$  ainsi que le mettent en évidence les courbes de fonçage de la figure 3, on peut donc conclure qu'il y a une meilleure utilisation de l'énergie fournie dans le premier cas que dans le deuxième.

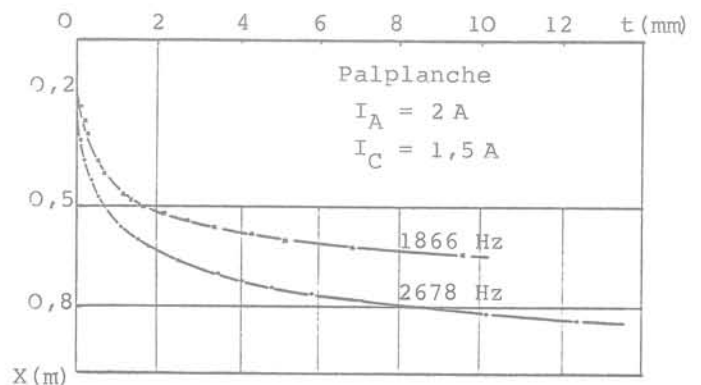


Fig. 3 - Courbes de fonçage.

Pour terminer, il nous a semblé intéressant de comparer l'énergie à fournir pour obtenir une fiche donnée en vibrofonçage et en statique. Les courbes de la figure 2 montrent que le bilan énergétique est favorable au vibrofonçage au moins tant que l'on n'est pas trop près du refus.

#### Etude comparative entre le pieu et la palplanche

Des essais comparatifs réalisés à la fréquence  $N_3$  et à même niveau d'excitation ont mis en évidence la différence de comportement de la palplanche et du pieu comme l'illustrent les courbes de fonçage de la figure 4.

On note que les variations de la vitesse en fonction de la fiche sont bien plus faibles pour le pieu que pour la palplanche. D'autre part la vitesse de fonçage en début d'essai est nettement plus importante pour la palplanche que pour le pieu. On aurait pu s'attendre à un résultat inverse dans la mesure où le poids Mg du système exciteur-pieu est supérieur à celui du système exciteur-palplanche. L'écart sur la fréquence qui est

de 10 % est insuffisant pour avoir une influence significative sur les résultats. Par contre, la différence de comportement provient vraisemblablement de l'effet de pointe. Pour mieux analyser ce résultat, on a monté un capteur de force à la pointe du pieu de façon à mesurer la force de pointe en cours de fonçage, opération pratiquement impossible à réaliser avec la palplanche.

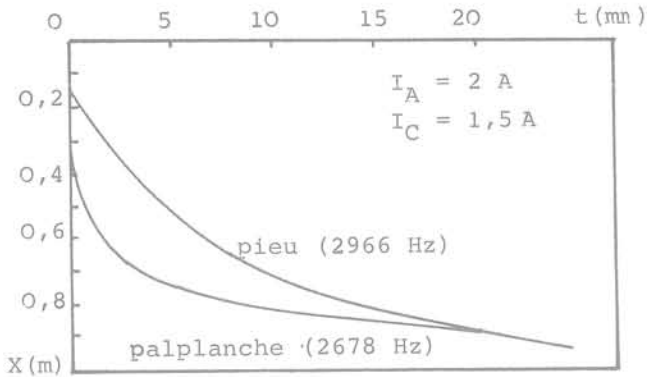


Fig. 4 - Courbes de fonçage.

La figure 5 montre que l'évolution de la force de pointe  $F_p$  est très régulière et même presque linéaire avec la fiche, comme l'évolution de la puissance fournie  $P_f$  correspondante (fig. 6) pour laquelle on ne note pas la décroissance brutale observée au début du mouvement dans le cas de la palplanche.

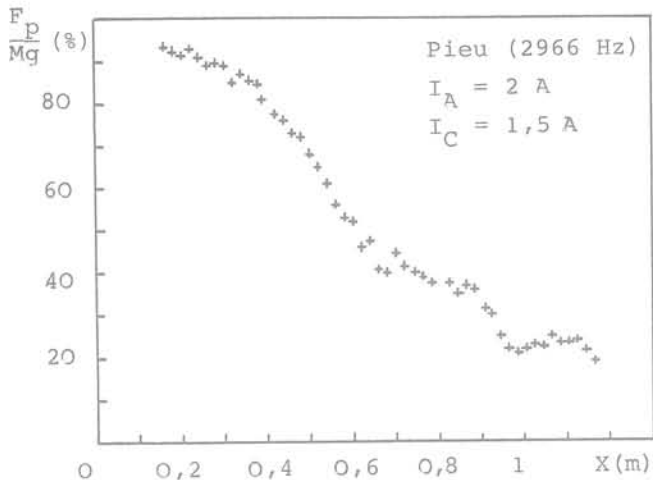


Fig. 5 - Force pointe.

Il y a tout lieu de penser que le transfert de la force de pointe à la force de frottement latéral qui s'effectue au cours du fonçage est beaucoup moins progressif pour la palplanche que pour le pieu. Comme la vitesse de fonçage dépend de la force de pointe, on peut donc ainsi expliquer la différence d'allure des courbes de fonçage. Le refus est atteint lorsque la force de pointe devient insuffisante pour que le pieu ou la palplan-

che puissent refouler le sol à leur base.

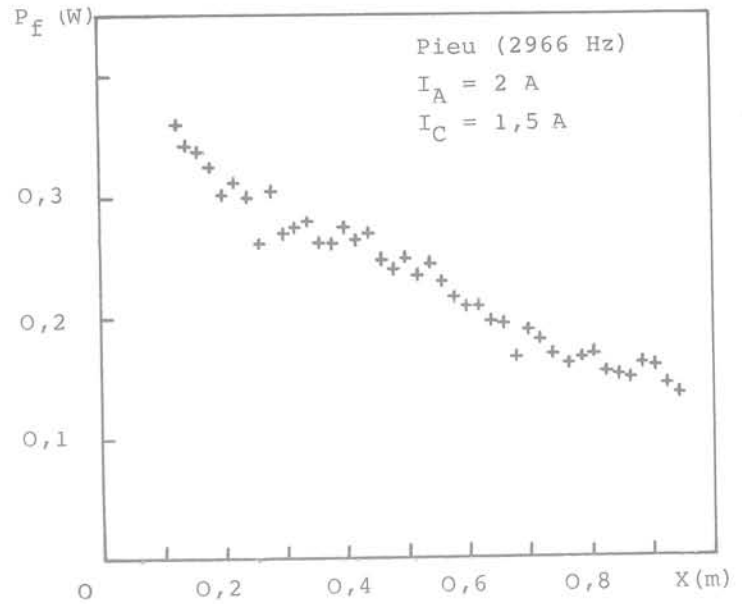


Fig. 6 - Puissance fournie.

L'allure des courbes d'énergie fournie (fig. 7) est semblable à celle des courbes de fonçage.

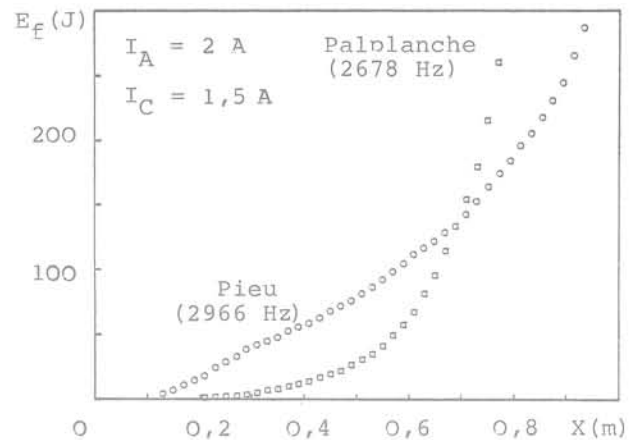


Fig. 7 - Energie fournie en fonction de la fiche.

Remarquons qu'au début du mouvement au moins l'énergie fournie au pieu pour atteindre une fiche donnée est supérieure à celle fournie à la palplanche. Ceci est à mettre en parallèle avec le fait que le volume de sol à refouler pour une même fiche est plus de 6,5 fois supérieur pour le pieu que pour la palplanche.

#### CONCLUSION

De cette étude, nous retiendrons les points

suiuants :

- L'expérience vérifie bien l'essentiel des résultats théoriques. En particulier, la puissance fournie par l'excitateur à la palplanche ou au pieu est une fonction décroissante de la fréquence. De plus, comme on l'avait déjà prévu, la fréquence de résonance correspondant à un ventre de vibration en tête est plus efficace (du point de vue vitesse, amplitude maximale obtenue et bilan énergétique) que celle correspondant à un noeud de vibration en tête.

- On a pu mettre en évidence une différence de comportement entre le pieu et la palplanche aussi bien pour les vitesses de fonçage que pour les puissances et les énergies fournies. Cette différence peut s'expliquer par un transfert plus rapide de la force de pointe à la force de frottement latéral pour la palplanche que pour le pieu.

#### REFERENCES

- Sieffert J G, (1974). Contribution à l'étude expérimentale du vibrofonçage des pieux à fréquence élevée. Thèse de Docteur-Ingénieur, Nantes.
- Sieffert J G, (1978). Contribution à l'étude du vibrofonçage des palplanches. Etude du rôle de l'amortissement interne dans un système excitateur à haute fréquence-barre. Bul. Liaison Labo. Ponts et Chaussées, 95, 5-12.
- Sieffert J G, (1980). Etude théorique et expérimentale du vibrofonçage à fréquence élevée des pieux et des palplanches. Thèse de Docteur-ès-Sciences, Nantes.
- Sieffert J G, (1980). Comportement d'une palplanche partiellement fichée dans le sol et soumise à une excitation sinusoïdale longitudinale. Annales Ponts et Chaussées, 15, 7-18.