

« BATTAGE ET VIBROFONÇAGE » RETOUR AUX SOURCES

Intervenant: Henri GONIN Date: 26 mars 2014

P.N.Vibrofonçage. Séance CFMS du 26/03/2014.

RETOUR AUX SOURCES

Chers collègues et amis,

Laissez-moi vous raconter une histoire (Figure 1) qui a quelque chose à voir avec la guerre des étoiles.

En 1977, à 44ans, j'ai été chargé par mon employeur Simecsol d'assister notre client Total pour les fondations de l'appontement pétrolier de Gravelines près de Dunkerque. Il s'agissait de gros tubes d'acier de 1m50 de diamètre, et de ducs d'albe de 3 m de diamètres, battus dans l'argile des Flandres à l'aide d'un mouton à vapeur de 20 tonnes de masse frappante.

Je ne disposais, dans ma boite à outils, que des reliquats des enseignements reçus, qui se limitaient à la formule des Hollandais qui m'avait toujours posé quelques problèmes, sans que, par timidité ou paresse, je ne m'en sois jamais ouvert à nos maîtres érudits. Ce qui me troublait, c'était la contradiction entre la conservation de la quantité de mouvement que l'on applique pour cette formule et la loi générale de conservation de l'énergie. (Figure 2).

Ingénieur formé à la vielle école, je n'étais pas formaté pour rechercher la solution dans wikipédia et je me voyais comme un



Voyage au pays de la Force ...





La formule des Hollandais et Le carreau parfait!

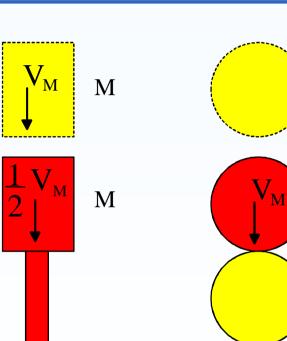
Énergie du mouton à l'impact

$$=\frac{1}{2}M V_m^2$$

Énergie de l'ensemble mouton + pieu

$$= \frac{1}{2} (M+M) \left[\frac{V_{\rm m}}{2} \right]^2 = \frac{1}{4} M V_{\rm m}^2$$

Où est passée la moitié de l'énergie du mouton ?



M

apprenti Jedi sans son sabre Laser. Je me suis donc tourné vers le grand Maître: Newton lui-même, et ce voyage initiatique dans l'espace et la Force, dont je vais vous donner un aperçu, m'a largement éclairé pour conseiller notre client, et m'a définitivement converti à la fois au battage et au vibrofonçage des pieux. On peut même dire que cela a influé sur la suite de ma carrière... jusqu'à Tuba et le P.N. Vibrofonçage!

Que nous dit Maître Newton, père de la Mécanique rationnelle ?

En premier lieu, qu'un corps solide peut être considéré comme un assemblage de particules massiques indéformables aussi petites que l'on veut liées entre elles par une loi de comportement (élasticité linéaire en petites déformations) : malgré ses démêlés avec son contemporain Robert Hooke, Newton ne le contredisait pas sur ce point!

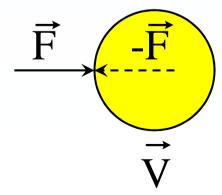
Mais surtout, il érige trois principes en forme de lois universelles : **(Figure 3)**

- 1) Une particule ou un corps qui n'est soumis à aucune action est soit immobile, soit en mouvement uniforme sur une trajectoire rectiligne;
- La quantité de mouvement d'un corps en déplacement étant défini comme le produit de sa masse par sa vitesse, l'action ou Force qui s'exerce sur lui est mesurée par la variation dans le temps de sa quantité de mouvement;



Lois de NEWTON

- $\vec{F} = 0$ Immobilité ou trajectoire rectiligne
- $\vec{F} \Delta t = \Delta (m \vec{v})$
- \bigcirc Action + Réaction = 0



June Force qui s'exerce sur un corps est toujours équilibrée par une force égale et opposée (principe de l'action et de la réaction).

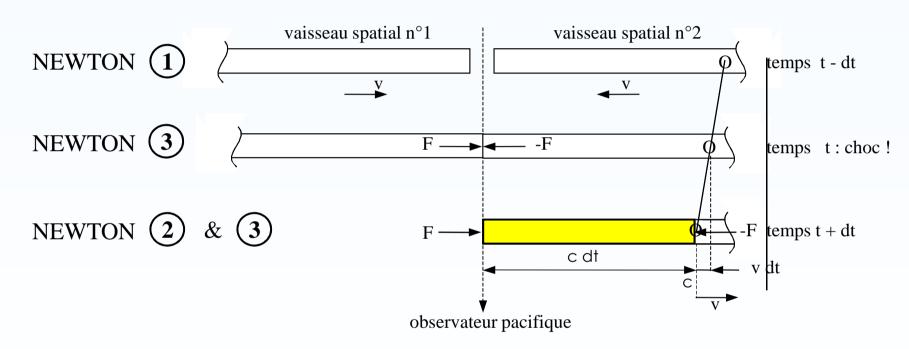
Muni du sabre Laser du Maître, je me suis téléporté dans l'espace et immobilisé en un point d'où je pouvais observer deux vaisseaux-tiges intergalactiques identiques, soumis à aucune force, qui se dirigeaient l'un vers l'autre à la même vitesse constante v. Le choc s'est produit au temps t. (Figure 4)

Ce retour aux sources, et le spectacle de la naissance d'une onde de compression dans le choc de deux tiges, m'a éclairé à la fois sur la validité de la formule des Hollandais, et le battage et le vibrofonçage des pieux. Il n'y a qu'une seule manière de communiquer de l'énergie à un pieu pour le faire pénétrer dans le sol, (Figure 5) c'est de le lancer comme une flèche et de le comprimer comme un ressort, et en cela ces deux techniques sont comparables. Le paradoxe du carreau parfait et de la formule des Hollandais tient simplement au fait que cette dernière fait l'hypothèse implicite (et injustifiée) qu'après le choc, le mouton et le pieu ne forment plus qu'un seul solide, alors que les boules de pétanque reprennent leur indépendance après le choc. Dans le transfert d'énergie, la déformabilité des corps solides joue un rôle primordial.

Peut-être vous dites-vous : Revenons un peu sur terre ! D'accord. (Figure 6). Le vaisseau spatial est devenu un pieu fiché dans le



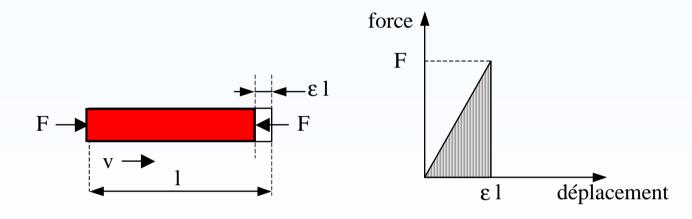
Cinéma d'un choc ...



$$\text{HOOKE} \quad : \; \epsilon = \frac{v \; dt}{c \; dt} = \frac{v}{c} = \frac{F}{E \; A} \; \longrightarrow \; v = \epsilon \; c = F \; / \; Z_c \\ \text{NEWTON 2} : \; F \; dt = \rho \; A \; c \; dt \; v \; \longrightarrow \; F = \underbrace{\rho \; A \; c \; v}_{\text{Impédance}}$$



Une flèche comprimée ...



Lancement d'une flèche précontrainte...

$$W_{def} = \frac{1}{2} F \epsilon 1$$
 $W = W_{def} + W_{cin} = \frac{1}{2} \left(\frac{F^2 1}{E A} + \rho A 1 v^2 \right)$



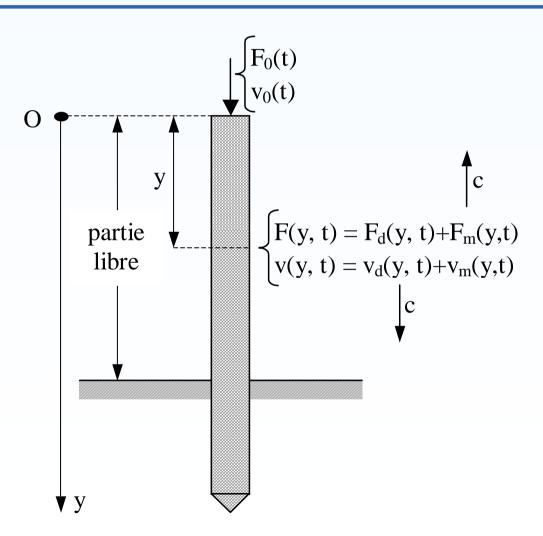
Un vaisseau tombé du ciel ...

Rappel:

Impédance $Z_c = \rho Ac = EA / c$

$$v = \pm \varepsilon c = \pm F / Z_c$$

Si l'onde change de sens, pour une même déformation ε, F ne change pas, mais v change de signe.



sol. Il est soumis en tête à une force F_0 qui peut être une fonction du temps, continue ou non. Dans sa partie libre, en un point M d'abscisse y, le pieu voit passer au temps t deux ondes de force qui se croisent que la gravité oriente : une onde montante, $F_m(y,t)$ et une onde descendante, F (y,t). Dans un milieu d

élastique linéaire libre, une onde est une fonction (déplacement u, vitesse v, accélération γ , déformation ϵ , force F) qui se propage, identique à elle-même, en le parcourant, dans un sens ou dans l'autre, avec une célérité c. Mais cette fonction, en un point donné, ne mesure pas la grandeur physique correspondante, qui résulte de la superposition de l'onde montante(m) et de l'onde descendante(d).

Les bases étant posées, je ne dis pas que tout devient facile, mais la construction devient solide; Je vous fais grâce des détails; je vous indique seulement quelques résultats assortis de remarques.

En premier lieu, **(Figure 7)** les relations entre les vitesses particulaires et les déformations dans une section d'un pieu équipée de capteurs de déformation et d'accélération permettent non seulement de calculer les ondes montantes et descendantes, mais aussi de tester et d'étalonner les mesures faites à vide (pieu libre) ou en début de fonçage.



Ondes montante et descendante

$$\begin{bmatrix} v_d = c \ \varepsilon_d \\ v_m = -c \ \varepsilon_m \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} F_d = Z_c \ v_d \\ F_m = -Z_c \ v_m \end{bmatrix}$$

Or, comme:

$$v = v_d + v_m$$

$$v = v_d + v_m$$
 et $F = F_d + F_m$

$$F_{d} = \frac{1}{2} (F + Z_{c} v)$$

$$F_{m} = \frac{1}{2} (F - Z_{c} v)$$

On mesure ε (jauges de contraintes) et γ (accéléromètre)

En deuxième lieu, (Figure 8) comme l'a bien montré Saint Venant dès 1867, le problème de l'impulsion donnée à un pieu par le choc d'un mouton tombant d'une hauteur donnée est résolu dans le respect de la mécanique rationnelle, avec l'hypothèse de tubes élastiques et d'ondes plates. (Figure 9)

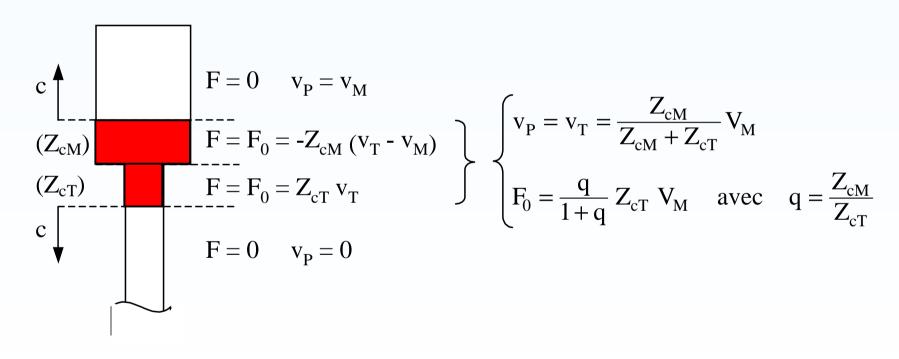
En troisième lieu, **(Figure 10)** et je considère que c'est l'un des apports majeurs du P.N. Vibrofonçage, il est possible, à partir de mesures faites en deux points d'un pieu, d'étudier la résultante de l'action du sol sur le pieu entre ces deux points au cours du fonçage, en supposant que cette action n'affecte pas la célérité des ondes dans le pieu, et qu'elle peut être simulée par une force axiale exercée en un point intermédiaire générant elle aussi un onde dans le pieu. Sur cette figure, les points de mesure sont M et P, le point d'application de la résultante des forces de cisaillement du sol sur le pieu est S dont la position entre M et P est paramétrée par α compris entre 0 et 1. La force exercée par le sol sur le pieu entre M et P est F ; elle génère dans le pieu une

onde montante et une onde descendante d'égales intensités en valeur absolue (F /2), l'une de traction, l'autre de compression s

(troisième loi de Newton). Il suffit d'écrire que l'onde montante en M reçoit celles qui sont déjà passées en P et en S, et que l'onde descendante en P reçoit celles qui sont déjà passées en M



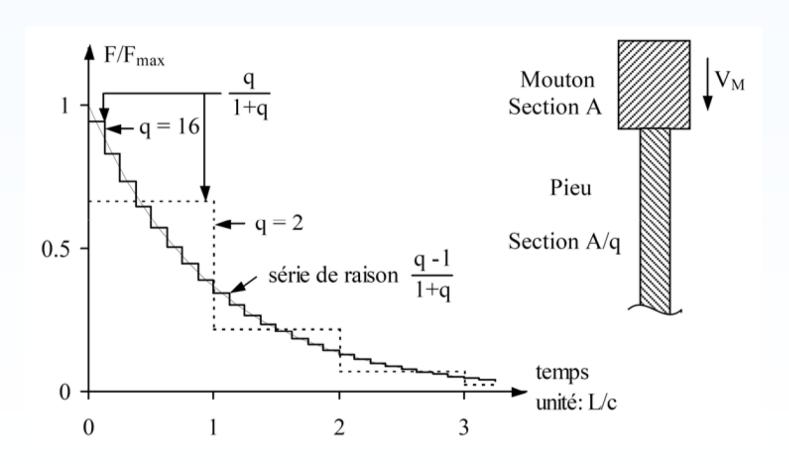
Choc d'un mouton ...



Choc d'un mouton (M) et d'un pieu (T)



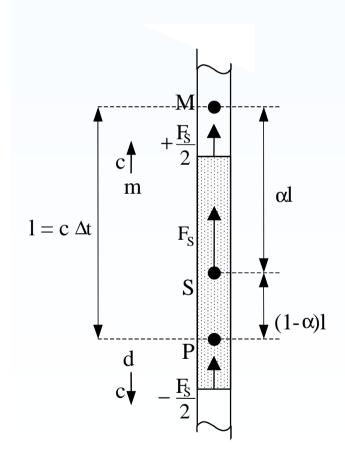
Impulsion donnée au pieu



$$F = F_{\text{max}} \exp(-ct/L) \qquad \text{avec} \qquad \qquad F_{\text{max}} = Z_{cP} V_{M}$$



Intervention du sol



$$\begin{bmatrix} F_{Mm}(t+\alpha\Delta t) = F_{Pm}(t+\alpha\Delta t - \Delta t) + \frac{F_{S}(t)}{2} = F_{Pm}(t-(1-\alpha)\Delta t) + \frac{F_{S}(t)}{2} \\ F_{Pd}(t+(1-\alpha)\Delta t) = F_{Md}(t+(1-\alpha)\Delta t - \Delta t) - \frac{F_{S}(t)}{2} = F_{Md}(t-\alpha\Delta t) - \frac{F_{S}(t)}{2} \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} F_{Md}(t-\alpha\Delta t) - F_{Pd}\left(t+(1-\alpha)\Delta t\right) = F_{Mm}\left(t+\alpha\Delta t\right) - F_{Pm}\left(t-(1-\alpha)\Delta t\right) \\ F_{S}(t) = F_{Mm}\left(t+\alpha\Delta t\right) + F_{Md}\left(t-\alpha\Delta t\right) - F_{Pm}\left(t-(1-\alpha)\Delta t\right) - F_{Pd}\left(t+(1-\alpha)\Delta t\right) \end{bmatrix}$$

$$v_{S}(t) = \frac{1}{Z_{c}} \left[F_{Pd} \left(t + (1 - \alpha) \Delta t \right) - F_{Mm} \left(t + \alpha \Delta t \right) \right]$$

et en S, pour obtenir deux équations qui permettent de déterminer les deux inconnues α et F .

S

Revenons maintenant sur le cœur de notre sujet, le battage et le vibrofonçage. Ils font partie de la même famille, mais ils n'ont quand même pas que des gènes communs! Par exemple, on n'applique pas les mêmes règles de portance pour des pieux mis en place dans des conditions de terrain semblables suivant leur mode de fonçage. Frédéric Rocher-Lacoste vous en parlera.

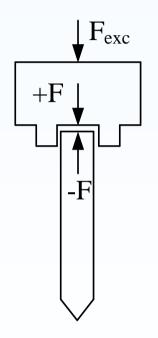
Le battage, très utilisé en off shore, a été très bien étudié et instrumenté depuis longtemps déjà. De nombreux modèles de simulations performants existent. La formule des Hollandais, que je critique surtout comme erreur pédagogique, est depuis longtemps reléguée aux oubliettes au profit de modèles prenant en compte la propagation des ondes. Je crois que l'on peut dire que cette technique, très ancienne, est en pleine maturité et progresse de manière adaptée aux temps modernes.

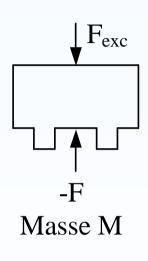
Il n'en est pas de même pour le vibrofonçage, dont l'essor ne date que des années 50. Les mesures in situ à partir d'instrumentation des pieux sont plus difficiles à étalonner, valider, interpréter. Les paramètres sur lesquels on peut jouer sont plus nombreux. Les sollicitations auxquelles les sols sont soumis ne sont pas du même ordre. Les modèles existant sont mal adaptés car mis au point pour le battage. Pour le battage, le

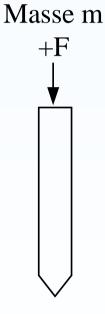
marteau est simplement posé sur le pieu (nous avons vu que c'était cela qui condamnait la formule des Hollandais) : il n'en est pas de même pour le vibrateur dans le vibrofonçage (figure 11). La liaison est alors assurée par des pinces, elle est rigide et cela est essentiel. Il est alors légitime de considérer que l'ensemble forme un seul corps, la partie active étant constituée par les masselottes excentrées fournissent qui une excitation sinusoïdale périodique. L'étude théorique du comportement de pieux libre ou encastrée à la base soumis à une excitation harmonique considérés rigides ou élastiques montre que l'approximation de pieu rigide est acceptable pour des pieux pas trop longs (15m) et des fréquences pas trop élevées (30Hertz): peut donc être très utile pour des prévisions vibrofonçage. Nous avons alors développé au cours du P.N. vibrofonçage, un logiciel de prévision (Braxuus) (Figure 12). Basé sur l'hypothèse d'un pieu rigide, ce logiciel est particulièrement simple d'utilisation, et il permet d'analyser de manière continue toute la durée du fonçage, ce qui n'est pas le cas des modèles basés sur la propagation des ondes, pour lesquels uns analyse doit être faite pour chaque profondeur. Il reste à constituer une banque de données pour le choix des paramètres modélisant le sol, suivant les indications tirées de l'interprétation des résultats des expérimentations grandeur nature faites dans le cadre du Projet National, et les observations recueillies depuis sur les chantiers...



Vibrateur et pieu







$$\frac{F_{\text{exc}}}{M+m} = \frac{F_{\text{exc}} - F}{M} = \frac{F}{m}$$

Pieu libre rigide :
$$\frac{F}{F_{exc}} = \frac{m}{M+m}$$

Pieu libre élastique :
$$\frac{F}{F_{exc}} = \frac{m \tan \beta}{m \tan \beta + M \beta}$$

$$\beta = \frac{\omega L}{c}$$



BRAXUUS



Le succès du vibrofonçage est un fait d'expérience : au cours du fonçage, on constate l'établissement d'un régime stable stationnaire ; la pénétration, souvent plus rapide que par battage, résulte d'un déséquilibre entre les phases ascendantes et descendantes du mouvement. Contrairement au battage, pour lequel le rôle de la gravité se limite à la mise en mouvement du mouton avant l'impact, il est ici essentiel dans le bilan des composantes ascendante et descendante des forces sur une période.

Je terminerai en vous présentant une comparaison à titre d'exemple. (Figure 13); pour un même profilé métallique de 15m de longueur et ayant une impédance d' 1 MNs/m et une section d'acier de 0,0247m2. Le mouton est supposé de masse égale à celle du profilé et il tombe d'une hauteur de 1m20. En vibrofonçage, on cherchera par exemple à obtenir une amplitude de vibration de 10mm avec un vibrateur de 30Hz. L'amplitude de la vitesse est alors de +/- 0,514m/s et celle de la force de +/- 0,514MN. La durée d'une impulsion est de l'ordre de 17ms. La puissance moyenne est de 129kwatt. L'amplitude de la déformation est de +/-0,1.10-3.

On voit que les sollicitations de l'acier sont beaucoup plus intenses pour le battage, bien que la puissance délivrée, qui dépend de la cadence, est moindre. Les vitesses particulaires, qui mobilisent directement la réaction du sol, ne sont pas dans le



Exemple

ACIER

Module de déformation : $E = 2,1 \times 10^5 \text{ Mpa}$ Masse volumique : 7 800 kg/m3

MARTEAU

 $\label{eq:Vitesse} \begin{array}{ll} \mbox{Vitesse du mouton juste avant l'impact:} & \mbox{V}_{\mbox{M}} = 4,85 \ \mbox{m/s} \\ \mbox{Force maximale de l'impulsion:} & \mbox{Fmax} = 4,62 \ \mbox{MN} \\ \mbox{Déformation maximale:} & \mbox{emax} = 0,89 \times 10 - 3 \\ \end{array}$

Durée d'un impact : environ 6 ms
Energie d'un coup : 34 020 Joules
Puissance moyenne d'un impact : 5 670 kW

La puissance moyenne délivrée pendant le battage à une cadence d'un coup par seconde n'est en revanche que de 34 kW.

	F _{max} (MN)	Contrainte Max. (MPa)	Déformation e (10 ⁻³)	Vitesse particulaire (m/s)	Energie par impulsion (kJ)	Puissance moy. par imp. (kW)
Battage	4,62	187	0,89	4,62	34,02	5 670
Vibrage	-0.514 +0,514	-21 +21	-0,1 +0,1	-0,514 +0,514	2,20	129

même registre. Les phénomènes de dégradation des caractéristiques des sols, parfois prépondérants, peuvent donc résulter de mécanismes différents ...

(Figure 14) Merci, chers collègues et amis, d'avoir bien voulu me suivre dans ce survol du sujet du jour : j'espère avoir ainsi éveillé votre intérêt et votre curiosité, car, croyez-moi, il y a encore beaucoup à découvrir et améliorer dans les larges domaines du battage et du vibrofonçage dans les Travaux publics! Et je rappelle à tous qu'après Transvib 2002 en Belgique et Transvib 2006 à Paris, on attend toujours un troisième Transvib! Mais je félicite le CFMS d'avoir consacré une séance technique au même thème!



Merci de votre attention