



APPLICATION DES TECHNIQUES DE PREVISION, D'INSTRUMENTATION ET DE CONTROLE DE BATTAGE AUX OUVRAGES PORTUAIRES

P. VERGOBBI , D. POULET

GEODIA - 205 avenue Georges Clémenceau - 92000 NANTERRE

ABSTRACT

The new developments of hydraulic hammers and the emergence of european competition cause in France a renew of interest for the use of driven pipe piles in civil engineering projects. In that respect, procedures and techniques, which have been developed for more than 30 years and are now of current practice in offshore, can be adapted to harbour and coastal engineering:

- *The target penetration of the piles should be defined on the basis of a static computation, considering the soil data available on the site and the efforts applied ;*
- *pile driving can be predicted using adequate and efficient procedures : determination of the soil resistance to driving and modelization of the hammer-pile-soil system using the unidimensionnal propagation of stress waves theory;*
- *pile driving can be instrumented and monitored in real time, giving to the engineer fundamental indications on the the dynamic response of the soil and on the hammer operating behaviour. Dynamic data thus obtained can be reanalysed, and allow to conclude on the acceptability of the pile in case of premature refusal.*

Recent projects in France and abroad have proved that an efficient quality control can be applied to pile driving operations. Some adaptations to the french situation must be done, mainly on the definition of adequate soil survey methods and the creation of pile driving tests data banks.

1. INTRODUCTION

L'accroissement et les évolutions du trafic portuaire entraînent la réalisation de nouveaux quais ou appontements, dont de nombreux exemples sont actuellement fondés sur des pieux ou profilés métalliques battus. Le recours à ce type de fondation conduit l'ingénieur à s'intéresser, en phase d'études puis de suivi de chantier, aux aspects suivants :

- dimensionnement des pieux de fondation ;
- prévisions de mise en place par battage ;
- contrôle et, éventuellement, instrumentation des pieux en cours de battage ;

- synthèse de l'ensemble des données acquises pendant ces différentes phases et expertise sur les fondations mises en place par battage.

L'objet de cette publication est de présenter un bref état de l'art dans le domaine de la Prévion, de l'Instrumentation et du Contrôle de battage des fondations sur pieux, en particulier dans les domaines portuaire et côtier.

2. BILAN ET PERSPECTIVES

Le pieu tubulaire mis en place par battage est un système de fondation nettement moins utilisé en France que dans d'autres pays à niveau d'industrialisation comparable. Parmi les raisons invoquées pour expliquer cet état de fait (historiques, économiques, techniques, réglementaires, géologiques, ...), la raison historique semble la plus fondamentale: d'une part, le dynamisme d'un certain nombre d'entreprises françaises et leurs compétences acquises dès les années 50 dans le domaine des fondations délicates, en particulier des pieux forés, parois moulées, etc, et, d'autre part, l'absence de combativité des batteurs de pieux, ont laissé associer à la solution pieu battu l'image d'une technique hasardeuse et dépassée.

Deux événements récents sont venus cependant depuis peu modifier cette situation et provoquer un regain d'intérêt pour les fondations sur pieux métalliques battus :

- sur le plan technique, on a assisté au développement spectaculaire des marteaux hydrauliques, spécialement adaptés aux conditions des travaux portuaires et terrestres, dans un domaine où seuls étaient jusqu'il y a peu de temps employés les marteaux diesel. L'apparition de tels matériels rend la traditionnelle notion de "refus" insuffisante et inadaptée pour juger de la capacité réelle du pieu ;
- sur le plan contractuel, l'ouverture des marchés de travaux publics à la concurrence européenne entraîne un rééquilibrage des procédures d'appel d'offres : plus grande initiative de l'entreprise sur le choix des solutions techniques, réelle compétition économique hors monopoles nationaux, ...

Une compétence réelle dans le domaine de la prévion et du contrôle de battage a été développée depuis plus de trente ans, principalement à l'étranger et dans le cadre des battages en mer. GEODIA, depuis sa création en 1981, a activement participé à cette recherche. Les techniques et méthodes mises au point et l'expérience acquise sont directement applicables sur des chantiers portuaires ou terrestres, et généralisables, moyennant certains aménagements, au battage d'éléments tels que les caissons ou les rideaux de palplanches. Un certain nombre de projets portuaires récents confirment cet

tendance (Ports Autonomes de Bordeaux, du Havre, de Nantes/St Nazaire, Port de Fort de France, terminal pétrolier de Matanzas à Cuba, ...).

3. PREVISION DE BATTAGE

L'étude prévisionnelle de battage doit faire partie intégrante de l'ingénierie des fondations. Il existe à présent des méthodes de prédiction suffisamment éprouvées pour traiter ce problème de manière systématique et détaillée.

Le dimensionnement de la fondation est une étape qui permet, sur la base des données de sol issues de la reconnaissance géotechnique et des efforts appliqués sur l'ouvrage, de déterminer les caractéristiques de la fondation: nombre de pieux, diamètre extérieur, épaisseur, longueur fichée dans le sol et nuance d'acier de ces pieux. Elle porte principalement sur la vérification de la capacité portante des pieux, estimée en conformité avec les réglementations ou recommandations en vigueur.

L'étude prévisionnelle de battage s'effectue avant le début des travaux sur site, sur la base des données de sol disponibles et des caractéristiques géométriques des pieux définies lors de l'étape de dimensionnement. Elle a pour objet de :

- définir les "procédures" et "matériels" à utiliser : choix du type de marteau (diesel, hydraulique), de la taille du ou des marteaux à mobiliser pour l'opération, ...;
- vérifier la compatibilité entre, d'une part, l'énergie à mettre en oeuvre pour vaincre la résistance du sol et, d'autre part, l'intégrité du pieu (section suffisante pour transférer l'énergie en pointe, niveau de contrainte dynamique, ...);
- établir des "critères d'arrêt de battage" ou des procédures à appliquer en cas de refus prématuré (curage interne, forage sous la pointe, ...). La notion de "critère d'arrêt de battage" est précisée plus loin.

Une étude de battage comporte deux étapes distinctes et complémentaires, suivies d'une étape de synthèse .

1. Détermination de la résistance du sol au battage : Etape (1)

La résistance du sol au battage (ou SRD, de l'anglais "Soil Resistance to Driving") doit tenir compte des propriétés mécaniques du matériau préalablement déterminées (reconnaissance géotechnique), du type de pieu (ouvert ou fermé, diamètre et section, présence éventuelle d'un sabot, ...) et de

phénomènes particuliers tels que, pour les pieux ouverts, la formation d'un bouchon. En pratique, on est amené à raisonner sur une fourchette de valeurs et à définir un profil minimal et un profil maximal de résistance en battage continu, ainsi qu'un profil après cicatrisation du sol suite à un arrêt de battage (Fig. 1).

La détermination de la SRD fait appel au savoir-faire du géotechnicien. Les procédures utilisées sont en particulier inspirées des recommandations de Toolan et al (1977), Stevens et al (1982) et Puech et al (1990). Elles sont bien évidemment d'autant plus efficaces qu'elles s'appuient sur une bonne connaissance du sol considéré, sur une longue expérience du battage dans le type de sol rencontré et qu'elles ont pu être recalées sur des cas réels sérieusement documentés.

2. Simulation du comportement du complexe marteau-pieu-sol : Etape (2)

Cette simulation est faite à l'aide de programmes numériques éprouvés, disponibles sur micro-ordinateurs et basés sur la théorie de la propagation unidimensionnelle des ondes de contraintes. Les codes sont dérivés de la résolution de l'équation d'onde (WEAP, TTI, BATTPILE, ...) ou de la théorie des caractéristiques (ADIG, TNOWAVE, ...).

Le résultat s'exprime sous la forme d'une relation, pour le système considéré, entre la résistance du sol au battage et le nombre de coups nécessaires pour enfoncer le pieu de 50 cm (courbes SRD-N/50cm, Fig. 2). Ces courbes sont établies pour différentes profondeurs de pénétration, et, pour quelques valeurs représentatives du rendement global du marteau considéré et de la répartition relative de l'effort résistant entre la pointe et le frottement latéral. On obtient en outre une estimation des contraintes maximales dynamiques de compression et de traction se développant dans le pieu lors du passage de l'onde de contrainte.

3. Courbes prévisionnelles de battage : Etape (3)

La comparaison des résultats de la simulation et des courbes de résistance permet d'établir les courbes donnant le nombre prévisionnel de coups par 50 cm en fonction de la pénétration (Fig. 3) et, ainsi, de juger de la faisabilité du battage. On admet généralement que le refus effectif se situe entre 250 et 350 coups par 50 cm, selon le type de marteau utilisé.

Il est prudent de choisir le marteau, de manière qu'en battage continu, le nombre de coups par 50 cm demeure inférieur à 150, l'expérience montrant que la fiabilité des méthodes actuelles de prévision décroît pour les fortes valeurs de N. Pour les sols argileux, où le risque de cicatrisation rapide est élevé, le critère ci-dessus pourra être abaissé, de manière à assurer en toute sécurité une reprise

de battage après un arrêt de quelques heures (panne ou changement de marteau, curage du bouchon, ...).

4. Fiabilité de la prédiction de battage

La fiabilité d'une prédiction de battage dépend fortement des trois conditions suivantes. La condition fondamentale est de disposer d'informations significatives sur la position et la nature des couches de sol. Il est essentiel qu'à l'issue de la reconnaissance, le géotechnicien soit à même de reconstituer de manière continue le profil stratigraphique et mécanique des matériaux sur la hauteur de pénétration projetée. La présence d'un banc résistant, même peu épais (grés, calcaire), non décelé ou mal identifié lors des sondages, constitue la cause majeure des déboires lors de la mise en place (refus prématuré, endommagement des tubes). La mise en oeuvre de moyens d'investigation susceptibles de fournir un profil continu des paramètres de sol doit être systématiquement recherchée et privilégiée. Le pénétromètre statique est, bien entendu, l'outil le mieux adapté, car il fournit en outre des paramètres directement utilisables pour le dimensionnement. A défaut, l'essai au pénétromètre dynamique ou l'enregistrement continu des paramètres de forage doivent être considérés. D'une manière générale, il est regrettable que l'utilisation de ces techniques ne soit pas plus répandue en France. Par ailleurs, il faut insister sur la nécessité de disposer d'échantillons de sol représentatifs en vue d'effectuer les essais de laboratoire appropriés.

L'appréciation réaliste du comportement dynamique du sol constitue une étape critique dans l'élaboration des prévisions de battage. Le rôle du géotechnicien est essentiel dans l'étape 1. Son expérience des problèmes de battage et sa connaissance des procédures sont, pour une large part, les meilleures garanties de la fiabilité du résultat.

Les résultats de l'étape 2 dépendent beaucoup des hypothèses formulées sur l'efficacité réelle du marteau utilisé. Des progrès considérables ont été faits ces dernières années dans ce domaine grâce à l'instrumentation, qui permet de mesurer directement l'énergie transmise au pieu.

5. "Critères d'arrêt de battage"

Dans l'état actuel des connaissances sur le comportement statique et dynamique des sols, il n'est pas légitime de garantir la capacité statique d'un pieu sur la seule base de son comportement dynamique. Dans ces conditions, la notion de "critère d'arrêt de battage" doit être maniée avec précaution et le sens de cette expression précisé.

En règle générale, la fiche contractuelle d'un pieu est déterminée de façon ponctuelle, au droit de chaque sondage de reconnaissance, sur la base des calculs de résistance statique. Parallèlement, l'étude prévisionnelle de battage permet de connaître les bornes minimale et maximale du nombre de coups attendu, au droit de ces mêmes sondages.

Au droit ou à proximité d'un sondage, le battage devra être poursuivi jusqu'à obtention de la fiche contractuelle. Dépasser la borne supérieure du nombre de coups attendu avant la fiche contractuelle requise du pieu, sera une indication que son comportement dynamique est "meilleur" que prévu. Dans cette hypothèse, et en cas de refus prématuré, le comportement du pieu devra être reanalysé à la lumière des nouvelles données fournies par le battage. Les conclusions pourront conduire, soit à la mise en oeuvre de procédures de confortation pour atteindre la fiche contractuelle, soit à une modification de la fiche contractuelle, soit à une acceptation définitive du pieu.

L'introduction de "critères d'arrêt de battage" sera nécessaire pour les pieux situés dans les zones éloignées de l'implantation des sondages, ou présentant des lacunes dans la connaissance stratigraphique ou géotechnique. Ce cas est fréquemment rencontré pour les ouvrages portuaires de grande longueur: quais, appontements, etc.

Ces critères permettront d'adapter ou de moduler les fiches de projet en fonction de la réalité du site, en prenant en compte les variations dans la stratigraphie et le comportement mécanique des formations. Ils seront établis sur la base des données de l'étude de battage effectuée sur les sondages les plus proches, et définiront un ensemble de conditions, pour un marteau fonctionnant à un rendement global donné : pénétration minimale, cadence de battage minimale, hauteur minimale sur laquelle cette cadence devra être obtenue, éventuellement cadences de reprise après un arrêt pour estimer les gains par cicatrisation, etc.

On notera que cette approche est infiniment plus restrictive et prudente que la notion traditionnelle basée sur l'évaluation d'un "refus" et qui prétend à partir de formules empiriques, souvent sans grand fondement, garantir que la capacité statique du pieu est atteinte.

4. INSTRUMENTATION ET CONTROLE DE BATTAGE

1. Principe

Le recours plus fréquent à des solutions sur pieux battus et les développements récents des marteaux ont conduit à mettre au point des systèmes d'instrumentation et de contrôle de battage. Ils sont basés sur :

- une instrumentation des pieux permettant de mesurer les accélérations et les contraintes induites dans la tête du pieu lors de chaque impact de mouton ;
- une analyse en temps réel des données acquises à l'aide de programmes performants fournissant essentiellement :
 - . les contraintes maximales induites dans le pieu,
 - . l'énergie réellement délivrée au pieu par le mouton,
 - . la résistance totale du sol sous chaque coup de marteau ;
- une analyse détaillée en temps différé des enregistrements à l'aide de programmes de simulation permettant en particulier de connaître plus précisément le comportement du complexe pieu-sol en cours de battage.

La mise en oeuvre de tels systèmes permet à l'ingénieur responsable de l'opération de disposer à tout moment de renseignements fondamentaux pour juger :

- des risques d'endommagement du pieu en cas de battage dans des formations dures ou hétérogènes. La vérification du niveau de contrainte délivrée au pieu permet de limiter les risques d'endommagement de la pointe ;
- du fonctionnement du marteau et de son efficacité réelle comparée à la valeur considérée dans l'étude prévisionnelle ;
- de l'accroissement de la résistance dynamique du pieu avec la pénétration.

La connaissance de ces données sur site est du plus grand intérêt en cas de refus prématuré. Elles fournissent au géotechnicien des éléments déterminants pour :

- juger si le refus est dû à une résistance du sol plus forte que prévue ou à un mauvais fonctionnement du marteau;
- prendre la décision d'accepter le pieu à la cote d'arrêt ou de mettre en oeuvre des procédures auxiliaires, susceptibles d'entraîner des surcoûts importants : mobilisation d'un marteau plus puissant, curage du bouchon, forage d'un avant trou, ...

En pratique, la mise en oeuvre d'un système de contrôle de battage se justifie dans les cas suivants :

- traversée prévisible de matériaux résistants (bancs de grès, ...); - risque de refus prématuré avec incertitude sur les performances du matériel de battage disponible (situation généralement génératrice de conflits contractuels) ;
- mauvaise connaissance géotechnique du site se traduisant par des incertitudes sur la capacité statique finale des pieux. On notera que, dans cette hypothèse et dans le cadre d'un gros chantier portuaire ou terrestre, l'économie d'essais de chargements statiques peut être réalisée.

2. Système GEOVIB

GEOVIB a acquis une solide expérience dans ce domaine au travers de GEOVIB, groupement d'intérêt économique avec la société METRAVIB. Le système GEOVIB se compose (Fig. 4) :

- de capteurs fixés sur le pieu,
- d'un système d'acquisition et de traitement.

Il a été développé pour être opéré dans des conditions de chantier (ambiance marine, ...) et est conditionné dans des conteneurs anti-choc pour être expédié rapidement aux quatre coins du monde.

2.1 Capteurs

Les capteurs utilisés sont des accéléromètres et des capteurs de contrainte (jauges, ...), disposés dans une même section en tête du pieu. Les jauges de contraintes sont directement soudées par points sur le pieu après polissage et nettoyage de la surface. Elles sont perdues en fin d'opération. Les accéléromètres (piézoélectriques) ainsi que la prise de connexion des capteurs sont fixés sur un support spécialement conçu qui est lui même vissé sur une platine soudée directement sur le pieu. En fin de battage, le support est dévissé de la platine et les fils de jauges sectionnés.

L'équipement d'un élément de pieu nécessite environ 2 heures et est effectué en temps masqué durant les phases de chantier.

2.2. Système d'acquisition et de traitement

Le système d'acquisition et d'enregistrement des mesures comporte :

- une unité de conditionnement et de prétraitement des signaux qui assure l'intégration des signaux d'accélération en vue de l'obtention de la vitesse particulière, la compensation des dérives de déformation dues à la flexion des pieux et le calcul des signaux moyens ;
- un oscilloscope à mémoire qui permet la visualisation immédiate des signaux prétraités;
- un enregistreur à cassettes analogique avec lequel sont enregistrés les signaux bruts ou prétraités nécessaires à une interprétation différée ;
- un micro-calculateur qui assure la conversion digitale des contraintes moyennes et des vitesses et calcule en temps réel les performances du marteau et la résistance dynamique du sol. Le calculateur est relié à une imprimante graphique.

3. Analyse des données

On distingue l'analyse en temps réel (sur site) et l'analyse détaillée en temps différé (sur site ou de retour au bureau).

3.1 *Analyse sur site*

L'analyse sur site est effectuée à l'aide du logiciel d'acquisition et de traitement compilé sur le microcalculateur portable. Pour chaque coup de marteau, les signaux moyens de contrainte et de vitesse en tête de pieu sont visualisés sur l'écran du micro-calculateur (Fig. 5).

Les programmes d'acquisition sont dérivés des méthodes analytiques basées sur la théorie de la propagation unidimensionnelle des ondes de choc. Parmi les sorties de battage déduites en temps réel et de façon standard, on obtient (Fig. 6):

- la contrainte d'impact en tête de pieu ;
- la vitesse particulière au même niveau ;
- la célérité calculée de l'onde de contrainte (doit être voisine de la célérité théorique des ondes dans le pieu, soit 5200 m/s environ par exemple pour un pieu acier) ;

- l'amplitude du premier pic de contrainte réfléchi ;
- le rapport pic réfléchi/pic incident (onde de compression) ;
- la résistance dynamique totale au battage;
- l'énergie incidente délivrée au pieu ;
- l'efficacité globale du système de battage.

L'efficacité globale du marteau est définie comme le rapport de l'énergie incidente dans le pieu à l'énergie nominale du marteau fournie par le constructeur. Elle caractérise le fonctionnement global du système de battage (mouton, coussin, enclume, ...) sur un pieu donné.

Des exemples de rendements globaux mesurés sur des marteaux diesel sont donnés dans la figure 7. Les valeurs sont relativement faibles (de l'ordre de 25 à 35 % en moyenne). Pour les marteaux hydrauliques, du fait de leur conception et de la définition de l'énergie nominale, des valeurs beaucoup plus fortes sont obtenues (de l'ordre de 65 à 85%).

3.2 Analyse détaillée des enregistrements dynamiques

A l'issue des travaux sur site, et à la demande du client, une analyse détaillée des enregistrements dynamiques peut être réalisée. Son objectif est de comparer le comportement observé en cours de mise en place au comportement prévu lors de l'étude prévisionnelle de battage. Cette comparaison porte sur la "courbe de battage" (nombre de coups par 50 cm), et sur la courbe de "résistance du sol au battage (SRD) avec la pénétration. La méthode, dite "méthode globale", a pour objectif de valider, voire modifier pour améliorer, les méthodes prévisionnelles de battage, en particulier le calcul de la SRD dans les couches de sol rencontrées sur le site.

La courbe de battage donnant le nombre de coups de marteau nécessaire pour faire pénétrer le pieu de 50 cm est fonction de 3 types de paramètres :

- l'énergie réellement transmise au pieu par le marteau,
- la résistance du sol au battage (SRD),
- les paramètres caractérisant la réponse dynamique du sol (facteurs d'amplification dynamique, vitesses élastiques, termes de rebond élastique, ...).

Les courbes de nombre de coups en fonction de la profondeur sont insuffisantes à elles seules pour établir s'il y a adéquation entre les prévisions et la réalité. La connaissance par l'instrumentation de l'énergie réellement transmise au pieu permet d'établir une relation directe entre le nombre de

coups et la résistance réelle au battage, sous réserve de se fixer les valeurs des paramètres caractérisant la réponse dynamique.

La démarche suivie est la suivante :

- la feuille récapitulative de battage permet d'obtenir à chaque pénétration considérée le nombre de coups N par 50 cm et l'efficacité globale du marteau au même instant ;
- l'introduction de ces deux paramètres dans les diagrammes (SRD.N/50cm) prévisionnels fournit la valeur correspondante de la résistance du sol au battage (SRD) pour les valeurs caractérisant la réponse dynamique choisies. Les valeurs traditionnellement utilisées dans les études prévisionnelles de battage sont retenues.
- la répétition de l'opération pour chaque cote donne la courbe de résistance du sol au battage "mesurée" en fonction de la pénétration. Cette courbe peut alors être directement comparée au faisceau établi lors de l'étude prévisionnelle de battage.

Un exemple d'application obtenu sur un projet d'appontement est donné sur la figure 8.

5. CONCLUSIONS

Les évolutions des ouvrages portuaires, l'ouverture des marchés de travaux publics à la concurrence internationale et les développements récents des marteaux hydrauliques conduisent les ingénieurs à s'intéresser particulièrement aux problèmes techniques et opérationnels posés par l'installation des pieux métalliques par battage. Les procédures, mises au point depuis plus de trente ans dans le domaine de la géotechnique marine, sont applicables aux ouvrages portuaires et côtiers :

- la longueur de pieu fichée dans le sol (ou fiche de projet) doit être déterminée sur les seules bases d'un calcul statique, en considérant les données de sol déduites de la reconnaissance géotechnique ;
- les conditions de mise en place par battage doivent et peuvent être prévues au moyens d'outils et de procédures adaptés: cette étape permet de déterminer la puissance du marteau à employer et le nombre de coups attendus dans ces conditions pour atteindre la fiche de projet ;

- le battage peut être contrôlé en temps réel au moyen d'une instrumentation en tête de pieu, qui fournit à l'ingénieur des données de première importance sur le fonctionnement réel du marteau et sur la réponse dynamique du sol ;
- les données de l'instrumentation peuvent être, le cas échéant, réanalysées pour conclure, en cas d'arrêt avant la fiche de projet, sur l'acceptabilité ou non des pieux, et, pour améliorer la connaissance des conditions de battage sur un site donné.

De récents exemples ont montré que les matériels et procédures disponibles permettent aujourd'hui d'assurer une maîtrise complète des opérations de battage et de garantir un contrôle qualité au moins équivalent à celui qui est mis en oeuvre pour les pieux forés.

L'adaptation de ces méthodes au contexte des travaux portuaires et côtiers français doit être poursuivie, en s'attachant particulièrement aux axes de recherche suivants :

- définition d'une méthodologie de reconnaissance géotechnique adaptée au cas des pieux métalliques battus en tenant compte des spécificités françaises (usage très répandu et trop souvent exclusif du pressiomètre) et de la nécessité d'avoir une image continue du sol ;
- développement des méthodes de calcul de la capacité portante et de la résistance du sol au battage en lien avec le point précédent; -
- établissement de banques de données de battage permettant de garder de façon active et objective la mémoire et l'expérience acquise sur un site donné.

Ces divers points ont d'ores et déjà retenu l'intérêt de la profession. On se référera notamment aux travaux engagés sur ce thème dans le cadre de l'IREX (Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation en génie civil) auxquels GEODIA participe activement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) American Petroleum Institute (1991), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms, API RP 2A, 19th edition
- (2) Meunier J. (1984), Laws of soil pile interaction in a pile driving simulation program, 2nd Conference on Application of Stress Wave Theory, Stockholm, pp. 326-331

- (3) Puech A., Poulet D. et Boisard P. (1990), A procedure to evaluate pile drivability in the difficult soil conditions of the southern part of the Gulf of Guinea, 22nd Offshore Technology Conference, Houston, paper 6237, pp. 327-334
- (4) Smith E.A.L. (1962), Pile driving analysis by the wave equation, Transaction ASCE, paper 3306, vol. 127, part 1
- (5) Stevens R.S., Wilstie E.A. et Turton T.H. (1982), Evaluating pile drivability for hard clay, very dense sand and rock, 14th Offshore Technology Conference, Houston, paper 4205, pp. 465-481
- (6) Toolan F.E. et Fox D.A. (1977), Geotechnical planning of piled foundations for offshore platforms, Proc. Institution of Civil Engineers, part 1, pp. 221-224

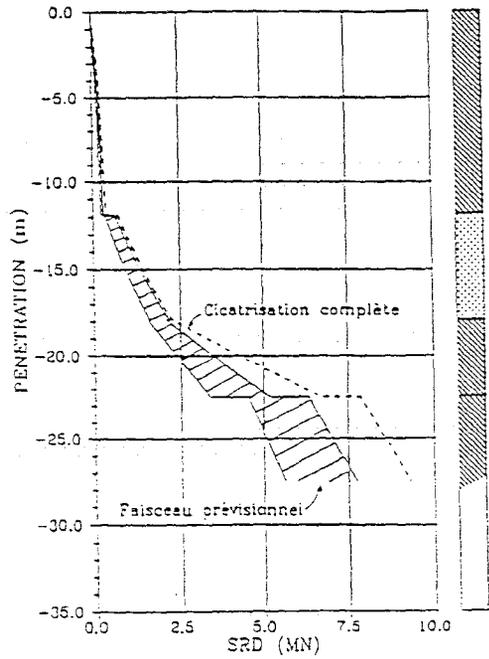


Fig. 1 : Résistance prévisionnelle du sol au battage (pieu 36" x 0.5")

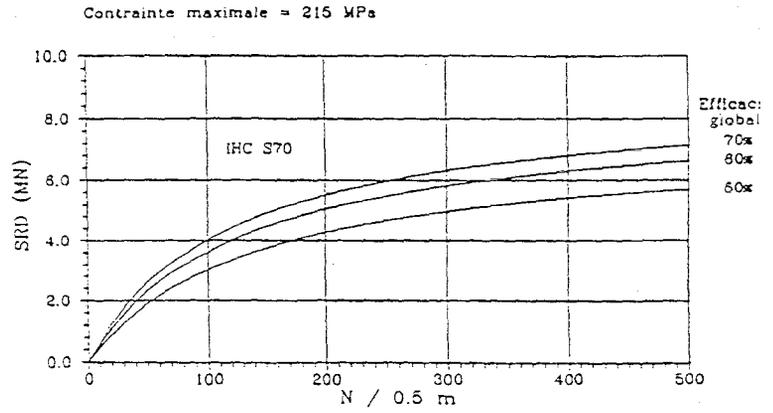


Fig. 2 : Simulation de battage (pieu 36" x 0.5")

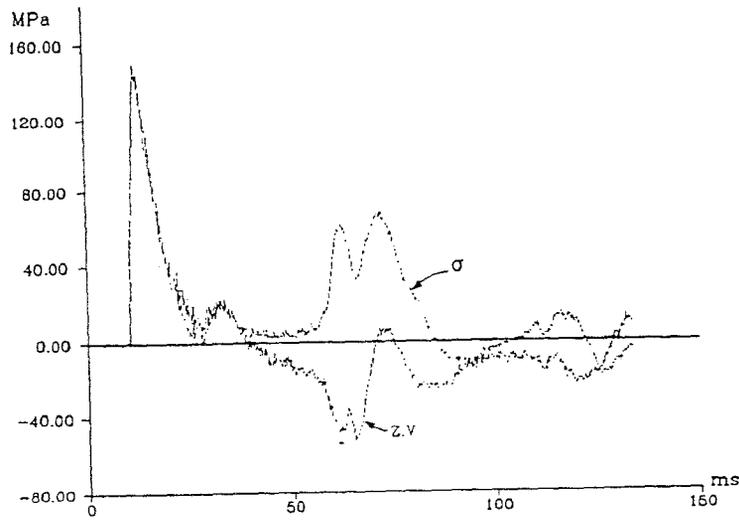


Fig. 3 : Courbes prévisionnelles de battage (pieu 36" x 0.5")

| MARTEAUX | RENDEMENT GLOBAL (%) | | | | |
|----------|----------------------|----|----|----|----|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| D | D 36 | ■ | ■ | | |
| | D 46 | | ■ | ■ | ■ |
| E | D 62 | ■ | ■ | ■ | |
| | D 80 | ■ | ■ | ■ | ■ |
| L | D 100 | ■ | ■ | | |
| | HERA | | | ■ | ■ |
| M | K 45 I | | ■ | ■ | |
| | K 45 II | | ■ | ■ | |
| A | KC 45 I | | ■ | ■ | |
| | KC 45 II | | ■ | ■ | |
| G | KC 45 III | | ■ | ■ | |

Fig. 4 : Système d'instrumentation et de contrôle de battage

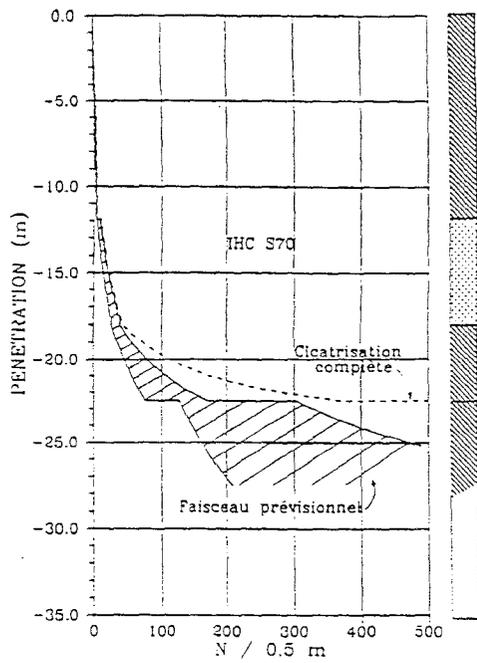


Fig. 5 : Signaux de contrainte et de vitesse

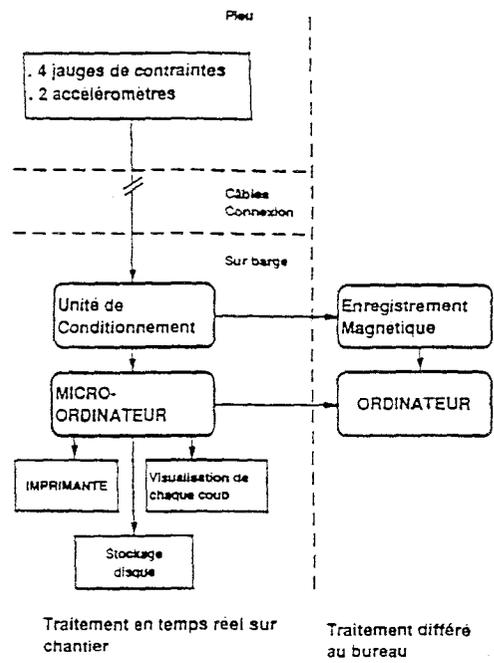


Fig. 7 : Rendements globaux mesurés sur des marteaux Diesel

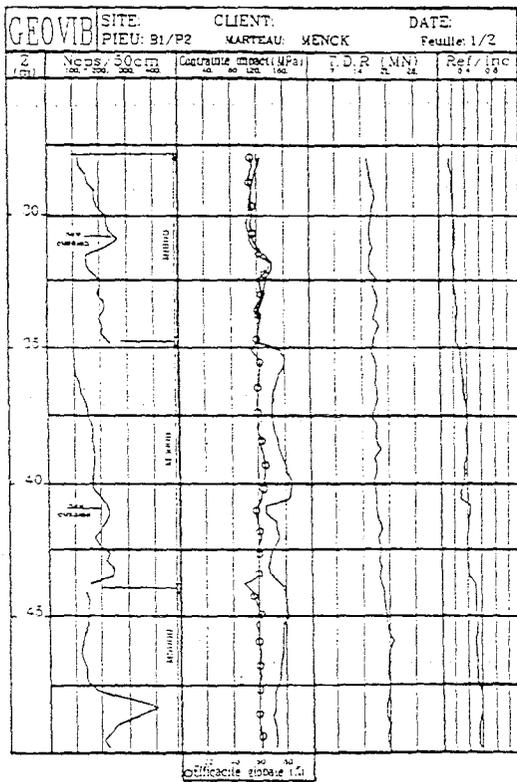


Fig. 6 : Paramètres de battage obtenus sur site

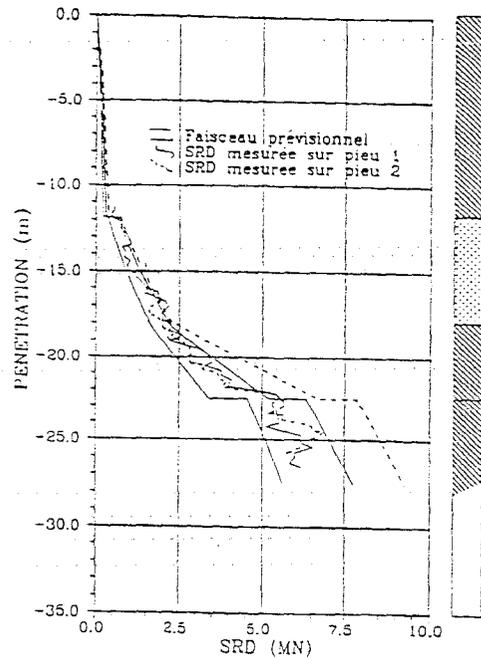


Fig. 8 : Comparaison des SRD mesurée et prévisionnelle (pieu 36" x 0.5")