



LE PROJET TUBA ET LE LOGICIEL CALYPSO

A. PUECH ⁽¹⁾, P. VERGOBBI ⁽¹⁾, J.Y. LE VEN ⁽²⁾ et J.M. SEVIN ⁽³⁾

⁽¹⁾ GEODIA, ⁽²⁾ Port Autonome de Bordeaux, ⁽³⁾ Port Autonome de Nantes-Saint Nazaire

Résumé

Le projet national de recherche TUBA lancé par le Club Travaux Portuaires de l'IREX a pour objectif le développement d'une procédure complète de prévision et de contrôle de battage des pieux métalliques. La méthodologie s'inspire de la pratique offshore largement développée mais est adaptée afin de tenir compte des spécificités et des besoins des travaux portuaires en France. Un élément fondamental du projet est la création du logiciel CALYPSO. Il s'agit d'une chaîne informatique permettant d'effectuer le dimensionnement et les prévisions d'installation des pieux battus, et de stocker et gérer l'ensemble des informations disponibles lors d'un projet de fondation sur pieux en site portuaire. Ce logiciel, implanté chez les Maîtres d'Ouvrage, les Entreprises et les Ingénieurs-Conseils, est destiné à devenir une référence pour la profession.

Le projet TUBA est considéré comme un élément décisif pour la relance du pieu métallique battu, actuellement très sous-utilisé en France.

Summary

The national research project TUBA sponsored by the "Club Travaux Portuaires" of IREX is aimed at developing a complete procedure for predicting and controlling the installation of driven metallic piles. The methodology derived from the offshore practice has been adapted in order to cope with the specificities and needs of coastal and harbour activities in France. A key-element of the project is the elaboration of the CALYPSO software. CALYPSO is a powerful engineering tool allowing for the dimensioning and driving predictions of steel piles but also for the storage and management of all types of data available in the framework of a pile foundation project in a portuary site. The program used by portuary authorities, installation contractors and consultants will become a recognized professional standard.

The TUBA Project is considered as a decisive step in promoting the use of driven steel piles in France where this type of deep foundation has been abusively disregarded so far.

1. UTILISATION DU PIEU METALLIQUE BATTU EN FRANCE

Le pieu métallique mis en place par battage est un type de fondation profonde relativement peu utilisé en France. Par rapport aux pays voisins ou à niveau d'industrialisation comparable, le marché français du pieu métallique est faible. Il est de l'ordre de 25.000 T par an à comparer aux 70.000 T utilisés en Hollande et aux 800.000 T utilisés au Japon !

Les raisons invoquées pour expliquer ce particularisme sont multiples : historiques, économiques, techniques,

réglementaires, géologiques. Toutes n'ont pas le même caractère d'objectivité ou de sérieux.

La raison historique est incontestablement la plus fondamentale dans la mesure où elle a entraîné une orientation du paysage économique, technique et réglementaire.

Par raison historique, on veut dire que dans l'immédiat après-guerre, sous l'impulsion d'ingénieurs remarquables, se sont développées en France des entreprises spécialisées dans les travaux de fondations délicates. Ces entreprises se sont illustrées par la mise au point de procédés nouveaux : rideaux étanches, parois moulées, barrettes, pieux forés, dont le dénominateur commun était le recours aux techniques de forage et cimentation. Au fil des années, elles ont développé un savoir-faire incontestable, amélioré leur technique et rendu le coût de réalisation de fondations sur pieux forés compétitif sur le marché national. Parallèlement, l'absence de combativité des batteurs de pieux et la vétusté des matériels utilisés ont laissé s'installer l'image d'une technique hasardeuse et dépassée.

De ce fait, le pieu foré bénéficie en France d'un a priori favorable, qui le place en situation de quasi monopole. A y regarder de plus près, on s'aperçoit que cette domination est aujourd'hui beaucoup plus explicable par un a priori "culturel" que par des justifications techniques ou économiques.

Une première constatation évidente est que la chaîne de conception des projets s'est peu à peu orientée sinon "distordue" de manière à entretenir la prédominance du pieu foré. Cette distorsion a été favorisée par le rôle prépondérant joué dans l'élaboration des projets d'ouvrages d'arts par les organismes publics (LCPC et Réseau des CETE, SETRA, SNCF...) qui interviennent à la fois comme organismes de réglementation, conseillers techniques, concepteurs d'ouvrages et donneurs d'ordre. C'est ainsi que, peu à peu, on a vu s'étoffer la réglementation et les recommandations en matière de pieux forés et que les solutions de base des appels d'offres sont aujourd'hui quasi systématiquement rédigées en faveur du pieu foré.

Une deuxième constatation est que la pratique française de reconnaissance des sols s'écarte sensiblement des standards internationaux sur au moins deux points essentiels :

- la pressiométrie a connu en France un développement considérable et atypique, à tel point que l'essai au pressiomètre Ménard est très souvent le seul essai in-situ mis en oeuvre ;

- le dimensionnement des fondations, y compris sur pieux, étant directement effectué sur la base des résultats pressiométriques, les sondages carottés sont souvent trop peu nombreux, conduits avec peu de soin, voire absents,

ce qui constitue une atteinte au bon sens géotechnique le plus élémentaire.

Cette particularité de la géotechnique française est indirectement préjudiciable au développement du pieu métallique battu dans la mesure où l'on ne dispose généralement pas, à l'issue de la campagne de reconnaissance, de profils de sol continus permettant par exemple de garantir l'absence de bancs durs sur la hauteur de pénétration nécessaire ou de connaître les propriétés mécaniques réelles de ces horizons lorsqu'ils existent.

Au final, il est devenu très difficile sinon utopique pour une entreprise française de travaux publics de chercher à comparer l'intérêt économique des solutions "pieu foré" et "pieu battu". La solution "pieu battu" ne peut intervenir que comme une variante à l'appel d'offres et l'entreprise ne dispose pas toujours du temps et, on l'a vu, de toutes les données nécessaires pour proposer une variante attractive au maître d'ouvrage.

2. EVOLUTION DU CONTEXTE NATIONAL ET PERSPECTIVES

La situation décrite ci-dessus est en cours d'évolution rapide sous l'action conjuguée de deux phénomènes.

Sur le plan technique, le développement récent d'une gamme de marteaux hydrauliques spécialement adaptés aux conditions de travaux portuaires et terrestres a modifié les données du problème. Le matériel est performant, fiable, léger, écologique. Les méthodes d'approche du battage recommandées par les constructeurs sont basées sur des méthodes modernes de prévision et de contrôle mises au point et appliquées dans les travaux offshore.

Sur le plan contractuel, l'ouverture des marchés de travaux publics à la concurrence européenne va entraîner un rééquilibrage des procédures d'appel d'offres. La tendance devrait être à :

- un moindre dirigisme du maître d'ouvrage sur le plan technique,
- une plus grande initiative de l'entreprise dans le choix de solutions,
- une ouverture réelle de la compétition économique hors particularismes nationaux,
- une homogénéisation progressive du contenu technique des appels d'offres visant à permettre une étude objective et complète des différentes solutions. Cet aspect concerne notamment la reconnaissance des sols,
- une harmonisation des réglementations et codes de calcul au niveau international (ISO et EUROCODES).

Il se dégage actuellement en France un consensus pour une meilleure utilisation du pieu métallique battu :

- les maîtres d'ouvrage aspirent à une plus grande liberté de choix pour les fondations des ouvrages,
- les entreprises prennent conscience qu'elles doivent renforcer leurs connaissances et leur compétence dans ce domaine pour être compétitives face à leurs concurrents européens,
- les aciéristes cherchent à accroître la pénétration des profilés métalliques dans le secteur du génie civil,
- les constructeurs de marteaux hydrauliques mènent une politique commerciale agressive et efficace,

- la communauté géotechnique prend conscience des évolutions inéluctables en matière de reconnaissance des sols et de l'insuffisance de la réglementation en matière de pieux battus.

3. CLUB TRAVAUX PORTUAIRES DE L'IREX

Le Club Travaux Portuaires qui s'est constitué sous l'égide de l'IREX regroupe une proportion importante de l'ensemble des acteurs intervenant dans le domaine des Travaux Portuaires en France :

- Maîtres d'Ouvrages (Ports Autonomes),
- Service Technique Central des Ports et Voies Navigables,
- Entreprises de travaux,
- Fournisseurs de profilés et tubes métalliques,
- Constructeurs de matériel de battage,
- Ingénieurs-Conseils en géotechnique.

Le Club comporte à ce jour 22 membres : Bouygues Offshore, Campenon Bernard SGE, Chantiers Modernes division Balineau, Dodin Ouest, EMCC, E.T.P.O., Geodia, GTM-BTP, IHC, Irex, ISPC, Marine Nationale STTIM, Port Autonome de Bordeaux, Port Autonome de Dunkerque, Port Autonome du Havre, Port Autonome de Nantes Saint Nazaire, Port Autonome de Paris, Port Autonome de Rouen, P.T.C., S.T.C.P.M.V.N., Simecsol et Spie Batignolles.

Dans un premier temps, le Club a fonctionné comme une cellule de réflexion sur les besoins du secteur portuaire en matière de fondations profondes.

Quelques idées maîtresses sont rapidement apparues :

- la nécessité économique de favoriser une relance des fondations sur pieux métalliques battus,
- le constat d'un certain retard technique notamment en matière de prévision de battage et contrôle de battage,
- l'existence d'un savoir-faire important dans le secteur de l'offshore pétrolier où la fondation sur pieux métalliques battus s'impose dans plus de 90 % des cas.

Ces quelques idées directives ont amené à l'élaboration d'un projet national de recherche qui a obtenu le soutien de la DRAST (Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Équipement). Le projet TUBA a été lancé en juin 1993. Sa réalisation a été confiée sur procédure d'appel d'offres au bureau d'Ingénieurs-conseils en géotechnique GEODIA.

4. OBJECTIF GENERAL DU PROJET TUBA

L'objectif général du projet TUBA consiste à développer une procédure complète de prévision et de contrôle de battage des pieux métalliques adaptée aux travaux portuaires français.

La procédure s'appuie largement sur la méthodologie mise en place dans les travaux offshore et qui repose sur trois décennies d'expérience. Toutefois des modifications ou adaptations sont introduites de manière à tenir compte de spécificités telles que :

- le type de reconnaissance géotechnique réalisable par faibles profondeurs d'eau,

- la pratique française en matière d'essais pressiométriques,
- la nature des sols effectivement rencontrés dans les zones portuaires actives,
- la longueur relativement faible des pieux et leur mode de fonctionnement,
- le type des engins de battage utilisés (marteaux diesel et hydrauliques).

Les aspects fondamentaux de la procédure portent sur :

- la définition des reconnaissances géotechniques nécessaires à une bonne prévision du comportement des pieux battus,
- la mise en place de méthodes de prédiction du comportement des pieux au battage en fonction du type de sol rencontré et du type de pieu concerné,
- la spécification de modalités de contrôle du battage des pieux métalliques,
- la création du logiciel CALYPSO destiné à :
 - gérer les informations dans le cadre d'un projet,
 - conduire les calculs prévisionnels,
 - stocker les données opérationnelles,
 - procéder à la post-analyse des résultats.

5. CONTENU TECHNIQUE DU PROJET TUBA

Le projet est articulé autour de cinq phases :

- une étude bibliographique,
- une étude théorique,
- deux expérimentations sur site,
- l'écriture du logiciel CALYPSO,
- le développement de la procédure.

5.1. Etude bibliographique

L'étude bibliographique est plus particulièrement axée sur quatre points :

- la comparaison des techniques de traitement des problèmes de battage des pieux métalliques dans les secteurs offshore et portuaire ou terrestre,
- la revue détaillée des méthodes de calcul de la résistance des sols au battage en usage dans le domaine offshore. Le rôle du bouchon et du sabot de battage sont notamment mis en évidence à la lumière des essais de pieux et des travaux les plus récents (essais L.P.D.T., CLAROM, EURIPIDES),
- la description des programmes de simulation de battage opérationnels basés sur la théorie de propagation des ondes (TTI, WEAP) ou sur la méthode des caractéristiques (TNO-WAVE, ADIG),
- le recensement des marteaux de battage avec leurs caractéristiques opérationnelles.

5.2. Etude théorique

L'étude théorique est consacrée à la modélisation du battage des pieux métalliques : modélisation des interfaces pieu-sol, réponse du sol aux sollicitations dynamiques, prise en compte des phénomènes d'amplification dynamique, dissipation d'énergie par plastification et radiation, etc.

L'objet est de faire le point sur l'état des connaissances, de définir les paramètres essentiels à la restitution des phénomènes de base et de proposer des guides pour le choix des valeurs à leur attribuer.

5.3. Expérimentations

Il est prévu de procéder à l'instrumentation au cours de battage de tubes métalliques ouverts. Cette opération sera effectuée sur deux sites portuaires à l'occasion de travaux.

Une première instrumentation a été réalisée en janvier 1994 au Port du Havre lors de l'installation du nouveau poste ferry du Bassin de la Manche. Elle a porté sur 3 pieux de diamètre 1220 mm, de 32 m de longueur, battus au moyen d'un marteau diesel (Delmag D25-32) à travers les sables et graviers et fondés dans les argiles raides.

On rappelle que l'instrumentation consiste à :

- équiper la tête du pieu de capteurs de contrainte et d'accélération,
- enregistrer et traiter les signaux recueillis sous chaque coup de marteau de manière à en déduire la contrainte dans le tube, l'énergie délivrée au tube et la résistance dynamique du sol.

Dans le cas présent des essais de surbattage ont également été effectués de manière à étudier l'effet de la cicatrisation du sol après arrêt de battage.

Les résultats des essais sont destinés à fournir des données de base pour le développement de la procédure d'instrumentation des pieux et d'exploitation des données de battage.

5.4. Logiciel

Le développement du logiciel constitue une part importante du projet.

Le logiciel a été baptisé CALYPSO ce qui signifie CALcul Informatique Intégré des Pieux de Structures Océaniques. Il s'agit en effet d'une chaîne complète constituée :

- de banques de données,
- de logiciels de calcul,
- de modules d'interconnexion,
- de logiciels graphiques.

CALYPSO permet de traiter un problème complet de fondation profonde et de gestion des données :

- stockage de données géotechniques sous la forme de profils et paramètres de projet,
- calcul de la capacité portante,
- calcul de la résistance dynamique au battage,
- simulation de battage et prédiction de pénétrabilité,
- stockage des données de battage,
- réanalyse des données de battage,
- stockage des résultats d'essais de chargement statique,
- édition graphique des résultats.

Il constituera de ce fait un outil de base pour les ingénieurs ayant en charge le dimensionnement des pieux.

Disponible à la fois chez les Maîtres d'Ouvrage, les Entrepreneurs et les Ingénieurs-Conseils, il est destiné à

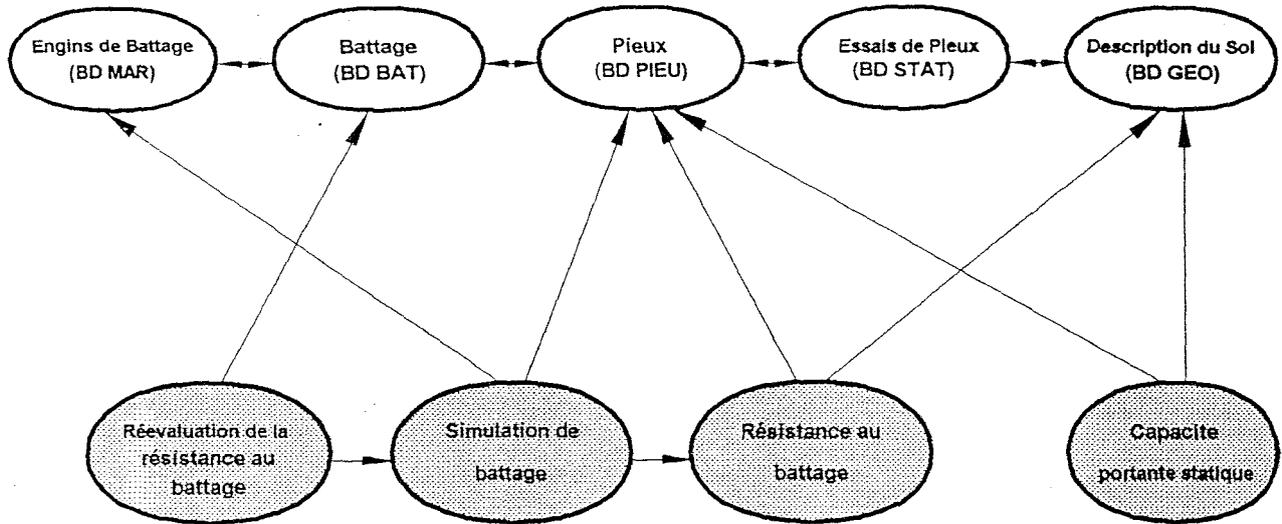


Fig. 1 : Schéma conceptuel de données (les flèches désignent les relations minimales nécessaires entre les différents ensembles d'observations)

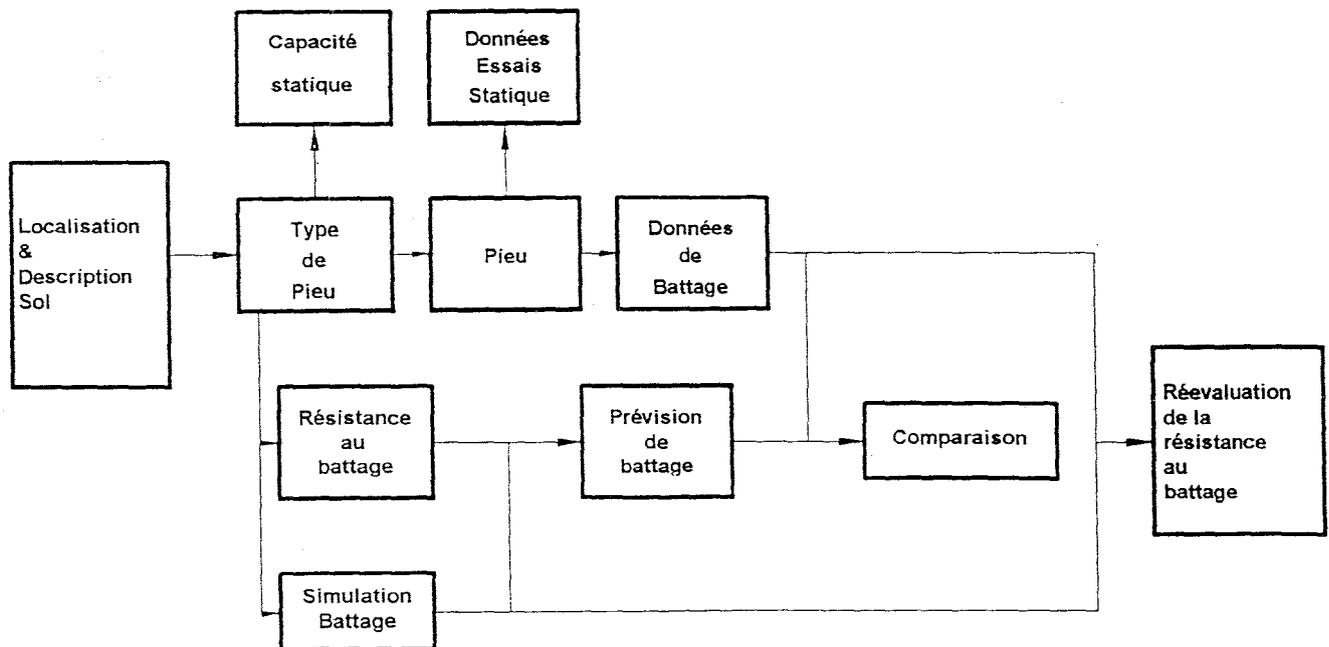


Fig. 2 : Architecture de CALYPSO - Schéma du tableau de bord

constituer un standard de référence pour l'ensemble de la profession.

Une description plus approfondie de CALYPSO est donnée au paragraphe 6.

5.5. Procédure

La procédure constitue l'objectif ultime du projet. Il s'agit de proposer une méthodologie complète et homogène pour le traitement de la prévision et du contrôle du battage des pieux métalliques battus.

La procédure portera notamment sur les points suivants :

- recommandations concernant le type de reconnaissance des sols à effectuer,
- harmonisation des termes à utiliser pour la description des sols et de leurs propriétés,
- méthodologie à respecter pour l'évaluation de la résistance des sols au battage,
- mode d'utilisation du logiciel de simulation de battage,
- recommandations en vue de l'évaluation des risques opérationnels de battage et définition des procédures de contrôle à mettre en place,
- rédaction de spécifications techniques pour appels d'offres d'instrumentation de battage.

6. LE LOGICIEL CALYPSO

Le logiciel CALYPSO intègre trois fonctions essentielles :

- gérer des banques de données,
- effectuer des calculs,
- imprimer des données et des résultats sous forme de tableaux et graphiques.

L'architecture d'ensemble du système est schématisée sur la figure 1.

• Les banques de données sont au nombre de cinq sans compter la banque de données des projets en amont du logiciel :

1. données de sol : profils de sol et paramètres de projet,
2. données sur les pieux : caractérisation des pieux du projet,
3. données sur les marteaux : paramètres de modélisation et données opérationnelles de plus de 150 marteaux,
4. données de battage : courbes de battage et résultats éventuels d'une instrumentation,
5. données d'essais statiques de pieux : résultats d'un éventuel essai de chargement statique.

Les banques 1 à 3 sont indispensables au déroulement d'une opération de dimensionnement.

Les banques 1, 4 et 5 sont destinées à constituer la mémoire du projet.

Les banques 4 et 5 sont réutilisables ultérieurement pour une post-analyse des résultats.

- Les modules de calcul sont destinés à quatre usages :

- évaluer la capacité portante des pieux métalliques à partir des données géotechniques et des caractéristiques des pieux,

- évaluer la résistance du sol au battage à partir des données géotechniques et des caractéristiques des pieux,

- effectuer les simulations de battage à partir des données de pieu, des données de marteau et des résultats de la résistance du sol au battage,

- réanalyser les données de battage pour parvenir à la résistance au battage réellement mesurée.

Les programmes de calcul des capacités statiques et dynamiques ont été développés par GEODIA pour les applications offshore et feront l'objet d'adaptations.

Le programme de simulation de battage retenu pour le projet est le programme ADIG basé sur la méthode des caractéristiques et développé par l'IFREMER.

- Le logiciel CALYPSO sera implanté sur des machines de type IBM PC ou compatible comportant un écran couleur :

- DOS et WINDOWS pour l'environnement système et gestion de l'interface utilisateur,

- langages C++ pour le coeur du système et FORTRAN pour les modules de calcul,

- PARADOX ENGINE pour la gestion des bases de données,

- bibliothèque graphique OBJECT GRAPHIC,

- DOC TO HELP pour la gestion de l'aide on-line.

Un soin particulier est porté sur l'ergonomie (similitude des barres de menus, fonctionnalités-types des tableurs,...), sur l'environnement graphique et sur une optimisation de la maintenance et des possibilités d'évolution du logiciel. Enfin, le coeur du logiciel est conçu autour d'un "tableau de bord" (Fig. 2) dont le rôle est multiple :

- contrôler l'avancement du projet,

- afficher l'ensemble des composants du système et montrer les enchaînements entre ces différentes tâches,

- proposer une démarche méthodologique,

- créer, éditer, détruire les objets et lancer les modules de calcul.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des membres du Club Travaux Portuaires de l'IREX et leur Président M. Piet (S.T.C.P.M.V.N.) pour leur autorisation à publier ce papier.

Les auteurs tiennent également à mentionner la contribution au projet amenée par les experts :

- J. Hamburger de la Société EREDIA : architecture et conception du logiciel CALYPSO,

- J.F. Jézéquel du L.R.P.C. de St Brieuc : intégration des données pressiométriques dans la procédure,

- J. Meunier d'IFREMER : adaptation du programme de simulation de battage ADIG.