

Projet de Fin d'Etudes, janvier à juin 2006
Rapport final, 29 mai 2006

Nuisances à l'environnement liées au fonçage de pieux et palplanches

Eric AKLE
Elève Ingénieur Génie Civil 5^{ème} année



Maître de Projet :
Gilles REBOUL

Département des Ouvrages d'Art (IGOA)
Section Structures Soutènements et Fondations (ST SF)
Projet de Recherche SNCF



Tuteur de Projet :
Jean-Georges
SIEFFERT

Département Génie Civil

Résumé

L'usage d'engins mécaniques puissants pour foncer des pieux et des palplanches dans le sol se multiplie. Deux méthodes s'imposent : le vibrofonçage et le battage. Les dommages qu'elles engendrent vis à vis de l'environnement proche, notamment ferroviaire, sont encore peu quantifiés. Dans une perspective économique et technique en amont des projets, une méthodologie d'analyse des risques devient indispensable.

Cet article donne une vue d'ensemble des prescriptions établies hors de France vis à vis de ces procédés, et propose des précautions de mise en œuvre et des méthodes de prévision des nuisances générées. Les enseignements des essais réalisés sur site sont également présentés.

Pour corroborer les prédictions établies, une analyse des sinistres répertoriés est à envisager.

Abstract

The custom of powerful mechanical machines to drive piles and sheet-piles in the ground multiplies. Two methods are commonly used: vibratory sheet piling and impact driving. The damages which they engender face to face of the close, notably railroad environment, are again little quantified. In an economic and technical prospect upstream to the projects, a methodology of analysis of the risks becomes indispensable.

This article gives a general view of the prescriptions established outside France face to face by these processes, and proposes precautions of stake in work and methods of forecast of the generated nuisances. The educations of the realized essays on-site are also presented. To confirm the established predictions, an analysis of the listed disasters is to be envisaged.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier toute l'équipe du groupe Fondations et Soutènements du département des Ouvrages d'Art de la SNCF pour leur accueil et leur aide, particulièrement mon maître de stage, Monsieur Gilles REBOUL pour avoir su me guider à travers ce Projet de Fin d'Etudes.

Je tiens également à remercier Monsieur Frédéric ROCHER-LACOSTE, LCPC, pour tout l'apport technique qu'il a su m'apporter, et pour l'opportunité qu'il m'a offerte de le suivre à travers sa thèse, notamment grâce à la collaboration qui s'est nouée vis-à-vis des études sur site.

Enfin, Je tiens à remercier Monsieur Jean-Georges SIEFFERT, INSA Strasbourg, pour sa disponibilité, son soutien et son suivi.

Sommaire

INTRODUCTION.....	6
MISE EN SITUATION.....	7
A. PRESENTATIONS DE LA TECHNIQUE ETUDIEE.....	8
1. Présentation du vibrofonçage.....	8
2. Fiche comparative des deux méthodes : Vibrofonçage/Battage.....	12
3. Présentation succincte du Projet National Vibrofonçage.....	13
B. LA PROBLEMATIQUE SNCF ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	14
C. EVOLUTION DU PROJET DE RECHERCHE SNCF A TRAVERS CE PFE.....	15
I. NUISANCES VIBRATOIRES.....	16
A. NUISANCES DIRECTES : LES VIBRATIONS.....	16
1. Mécanisme des vibrations.....	16
2. Réglementation, normes en vigueur.....	17
3. Méthode de prévision, recherches entreprises.....	20
4. Fiabilité et pertinence de la méthode de prévision de l'Eurocode 3.....	21
B. NUISANCES INDIRECTES : LES TASSEMENTS.....	24
1. Mécanisme des tassements.....	24
2. Réglementation, normes en vigueur.....	26
3. Méthode de prévision, recherches entreprises.....	28
4. Fiabilité des méthodes préconisées ici.....	36
II. CAMPAGNE D'ESSAIS.....	38
A. GENERALITES.....	38
B. METHODOLOGIE D'EVALUATION DES NUISANCES.....	38
1. Mesure des vibrations.....	38
2. Mesure des tassements.....	41
3. Mesures élargies aux autres nuisances.....	41
C. CHANTIERS AUSCULTES.....	42
1. Verberi : Fonçage de palplanches dans les locaux d'ICE-IHC.....	42
2. Vesoul : suppression d'un passage à niveau.....	45
3. Bordeaux : suppression d'un bouchon ferroviaire.....	53
III. PROPOSITION D'UNE REGLEMENTATION.....	57
A. APPROCHE DES RISQUES LIES AUX VIBRATIONS.....	57
B. APPROCHE DES RISQUES LIES AUX TASSEMENTS.....	58
1. Objet du document.....	58
2. Préambule : portée du document.....	58
3. Considérations générales sur les principaux facteurs de risque vis-à-vis du tassement des terrains sous l'effet du vibrofonçage.....	59
4. Appréciation du risque en fonction de la nature du sol et de la sensibilité de l'ouvrage.....	61
5. Recommandations suivant le niveau de préjudice encouru N1, N2 ou N3.....	63
CONCLUSION.....	65
BIBLIOGRAPHIE.....	66
NORMES EXISTANTES SUR LE SUJET.....	67
GUIDES POUR LE MESURAGE DES VIBRATIONS.....	68
ARTICLES ET PUBLICATIONS.....	69
Sur les tassements :.....	69
Sur les vibrations :.....	70

Table des illustrations

Tableau 1 : Comparatif des critères d'évaluation des seuils de vibrations.....	18
Tableau 2 Type de dommage sur voies ferroviaires	27
Tableau 3 : Formules liant les grandeurs vibratoires entre elles	35
Figure 01 : Exemples d'opérations de vibrofonçage	7
Figure 02 : Exemple d'opération de vérinage	7
Figure 03 : Exemple d'opération de battage	7
Figure 04 : Schéma type de la technique de vibrofonçage.....	8
Figure 05 : Schéma type du vibreur	9
Figure 06 : Principe mécanique du vibreur	9
Figure 07 : Mécanisme de fonçage	10
Figure 08 : Exemple de type de casques	11
Figure 09 : Comparaison entre normes de vibrations continues	19
Figure 10 : Comparaison entre normes de vibrations intermittentes	19
Figure 11 : Vibrofonçage méthode Eurocode 3 / mesures effectuées sur site	22
Figure 12 : Battage méthode Eurocode 3 / mesures effectuées sur site	22
Figure 13 : Abaque liant accélérations particulières, fréquence et vitesses particulières	35
Figure 14 : Résumé des indications sur les tassements	37
Figure 15 : Outils de mesure des Vibrations	39
Figure 16 Vue type d'un Géophone	39
Figure 17 Sens de mesure d'un géophone.....	39
Figure 18 : Verberi / Vibrofonçeur ICE216.....	42
Figure 19 : Verberi / Appareillage de mesure	42
Figure 20 Verberi / Evolution du fonçage dans le temps	44
Figure 21 Influence de la profondeur de fonçage sur l'amplitude des vitesses particulières ..	44
Figure 22 : Verberi / Evaluation de l'atténuation des vitesses particulières avec la distance.	44
Figure 23 : Vesoul / Trépideur Menck120 à proximité de la voie	46
Figure 24 : Vesoul / Vibreur PTC20H et voies ferroviaires.....	46
Figure 25 : vue d'ensemble du chantier.....	46
Figure 26 : Atténuation des décibels en fonction de la distance par rapport à la source	49
Figure 27 : évolution de l'amplitude des vitesses particulières avec la distance au système vibratoire pour les phases de trépidage, MENCK SB120.....	51
Figure 28 : Evolution de l'amplitude des vitesses particulières avec la distance pour la phase de vibrofonçage, PTC20H	51
Figure 29 : Comparaison de l'évolution de l'amplitude des vitesses particulières suivant la profondeur de fonçage selon les 3 directions de mesures, MENCK SB120	52
Figure 30 : Engin de forage (Becket).....	53
Figure 31 : Passerelle de Bordeaux	53
Figure 32 : Comparaison entre nuisances vibratoires induites par les engins de chantier et les trains.....	55

Annexes

- Comparatif de normes internationales
- Résumé des méthodes de prévision des tassements
- Macro Visual Basic pour le traitement de données acquises sur site

Introduction

Pour comprendre la problématique de la SNCF, il faut envisager le contexte dans lequel elle évolue.

L'absence de connaissances et de retours d'expériences sur les nuisances engendrées par les techniques de fonçage entraîne le maître d'œuvre SNCF à éviter ces méthodes en sites sensibles.

Au début de l'année 2006, la technique du vibrofonçage est de plus en plus utilisée. La pression des entreprises pour pouvoir utiliser cette méthode augmente car elle présente des avantages non négligeables qui sont entre autres :

- Un gain de temps : 10mn de fonçage en moyenne par élément
- Un avantage économique
- Un gain de sécurité : il n'est pas nécessaire de maintenir l'élément à foncer lors de la mise en fiche
- Un gain de place sur chantier

Actuellement, l'alternative employée en cas de risques est le battage.

Cependant, il est également avéré que cette technique peut parfois se révéler plus nocive dans certains cas que le vibrofonçage. L'enjeu est donc de faire le point sur les risques encourus par ces méthodes et de pouvoir les comparer dans le cadre d'un usage préalablement défini.

Aboutir sur des règles de prévision des nuisances liées aux méthodes de fonçage permettrait en amont des projets de déterminer l'impact des solutions constructives et d'affiner les phases de chantier. A cette fin, Aurore LEJEUNE avait entamé une phase exploratoire que je viens compléter et affiner.

De plus, toujours en restant dans le contexte de ce début d'année 2006, l'Ingénierie SNCF est de plus en plus mise en concurrence par le maître d'ouvrage RFF. De ce fait, le gain économique et le gain en temps d'exécution sont des données de plus en plus pertinentes.

La pression des fabricants de vibreurs est également forte car ils se sentent discriminés vis à vis des fournisseurs d'engins de battage. Ils poussent donc la SNCF à justifier sa normalisation et ses choix techniques.

Qui plus est, dans le domaine des soutènements et des fondations, la SNCF a un savoir-faire reconnu qu'elle affiche en étant partie prenante en termes de publications et de recherches entreprises. De ce fait, et afin d'affirmer sa place, elle doit être en mesure de mieux approcher ces questions.

Tous ces faits concourent à renforcer l'attente, le poids et donc la légitimité de cette étude pour la direction de l'ingénierie de la SNCF.

Mise en situation

Il existe trois méthodes aux principes différents pour insérer des pieux et des palplanches dans le sol: Le vibrofonçage, le battage et le vérinage. Les deux premières sont de loin les plus utilisées dans les enceintes SNCF. Le vibrofonçage est une technique encore crainte pour nuisances qu'elle peut engendrer et de ce fait, le battage est souvent utilisé par défaut.

Dans le cadre de ce projet, je me limiterai à l'étude des nuisances créées par le vibrofonçage. Une étude comparative des nuisances engendrées par le battage et le vibrofonçage sera menée à la suite de ce PFE.



Figure 01 : Exemples d'opérations de vibrofonçage



Figure 02 : Exemple d'opération de vérinage



Figure 03 : Exemple d'opération de battage

A. Présentations de la technique étudiée

1. *Présentation du vibrofonçage*

La source des informations délivrées dans cette partie provient principalement de l'étude exploratoire menée par l'IREX en amont du Projet National Vibrofonçage.

a) Généralités

Le vibrofonçage est utilisé depuis les années 1950. Schématiquement, le vibrofonçage utilise des vibrations forcées pour enfoncer ou arracher un pieu du sol.

De nouvelles applications du procédé ont récemment vu le jour grâce à l'amélioration des technologies. Ainsi, de nouveaux vibreurs, plus performants, sont utilisés : vibreur à hautes fréquences ou à masses excentrées. Avec ces nouveaux équipements, le vibrofonçage est devenu une technique plus adaptée aux travaux en site sensible, notamment en ville car elle produit moins de bruit que le battage. Outre cet avantage, le vibrofonçage est également un outil très compétitif en termes de rendement et de cadence. En effet, la durée de mise en place des pieux est significativement accélérée par rapport au battage. De plus, le vibrofonçage peut être mis en œuvre aussi bien à l'air (vibreurs hydrauliques, diesels ou électriques) qu'en milieu sous marin (vibreurs hydrauliques ou électriques).

Cependant, le vibrofonçage possède un inconvénient non négligeable : la capacité portante. Des essais ont en effet montré que la portance des pieux vibrofonçés est, non seulement mal connue, mais également inférieure à celle des pieux battus. Ceci explique, en partie, la réticence des professionnels vis-à-vis de cette technique. Le projet national Vibrofonçage lancé par l'IREX vient répondre à ces interrogations vis-à-vis de la fonçabilité, notamment grâce au développement de logiciels tel que Braxuus.

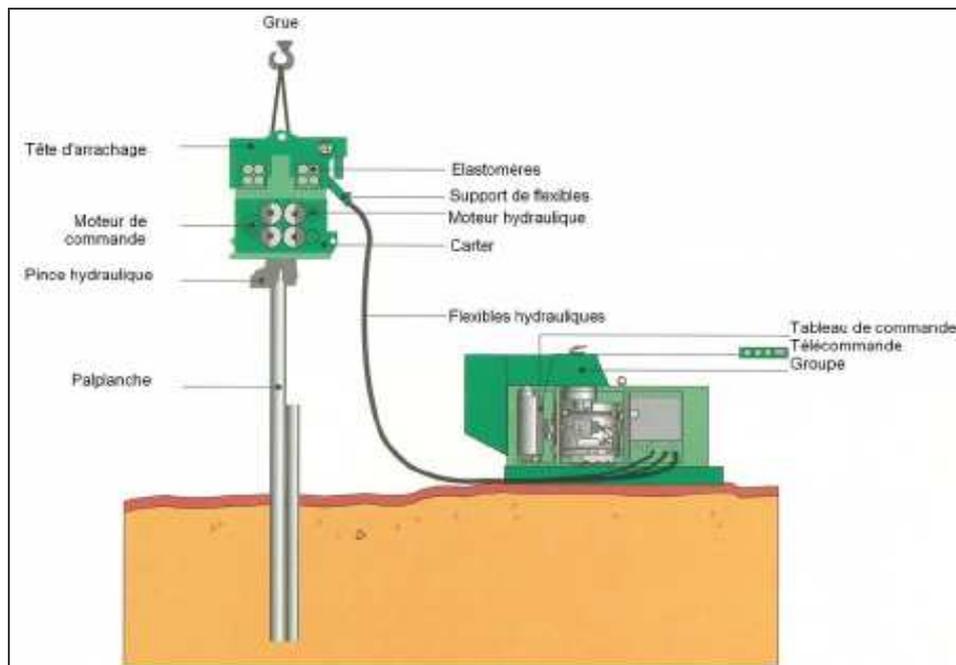


Figure 04 : Schéma type de la technique de vibrofonçage

b) Présentation succincte du matériel de vibrofonçage

Les vibrations sont générées par un vibreur alimenté par un générateur, dans la plupart des cas hydrauliques (ou électrique ou diesel). La force gravitationnelle verticale qui permet l'enfoncement provient de la rotation de masses. Elle est transmise au profilé par l'intermédiaire d'une pince.

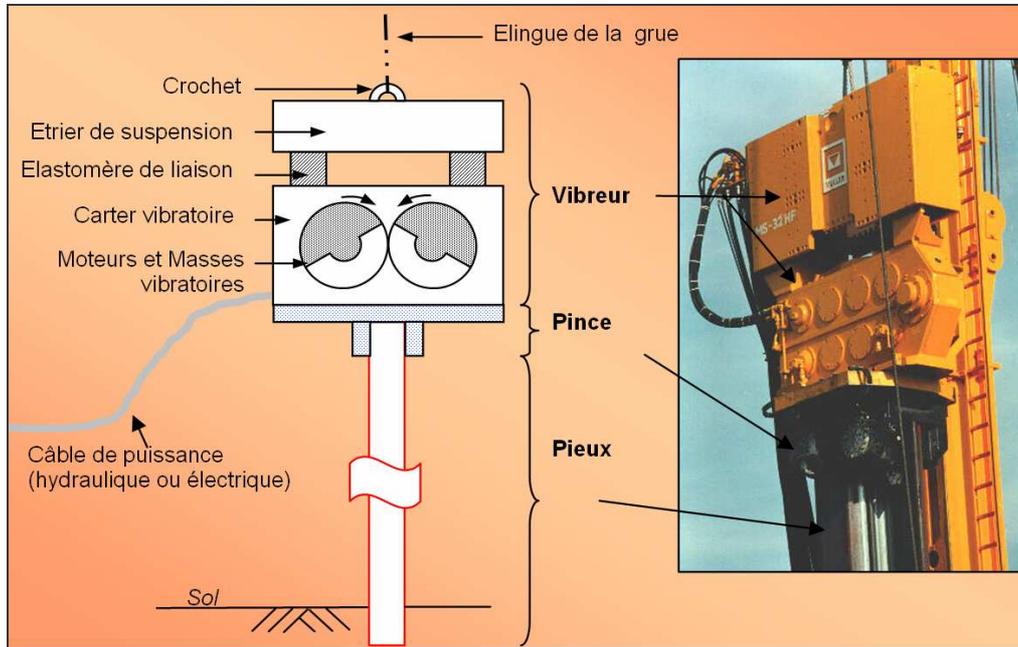


Figure 05 : Schéma type du vibreur

Le vibreur est le « cœur » du système de vibrofonçage.

Il est composé de trois éléments : le carter vibrant, l'étrier de suspension et le casque.

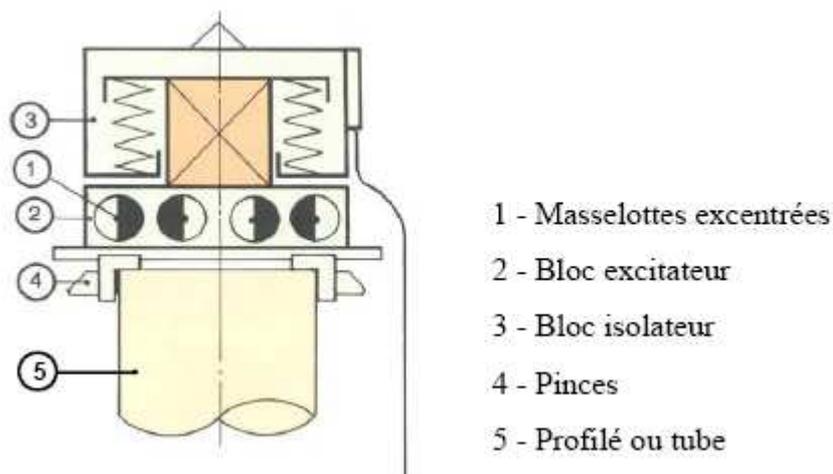


Figure 06 : Principe mécanique du vibreur

Le carter vibrant :

Le carter vibrant est un des éléments du vibreur en vibration. Le phénomène de vibration est généré par la rotation de masses excentrées identiques (ou balourds), tournant à la même vitesse mais en sens opposés. La force résultante de ces rotations est une force uniquement verticale.

Ces balourds sont toujours en nombre pair quelque soit la taille du carter vibrant.

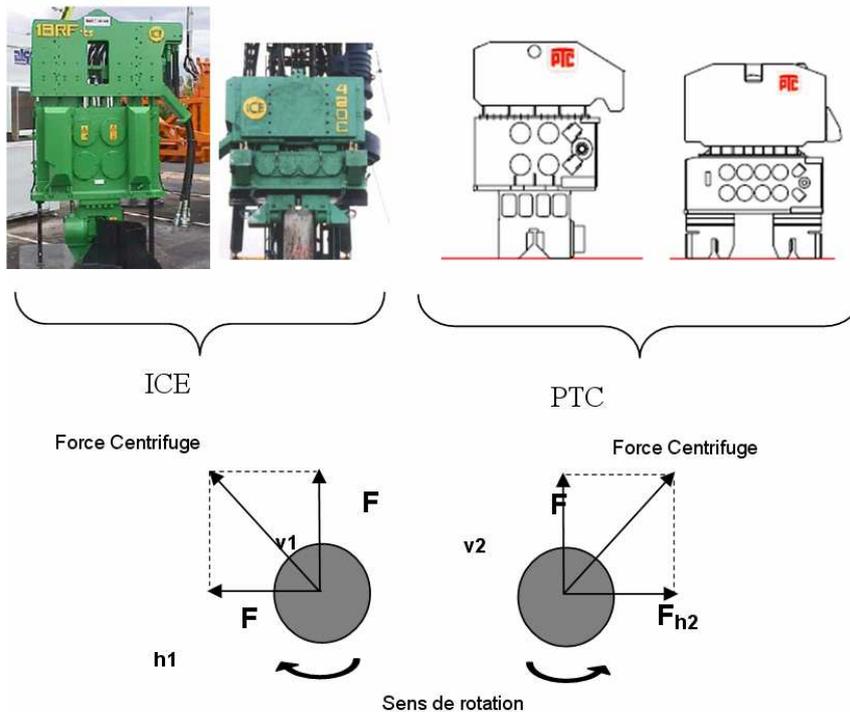


Figure 07 : Mécanisme de fonçage

Le fait que les deux balourds tournent en sens opposé a pour conséquence d'éliminer les forces horizontales F_{h1} et F_{h2} puisque à chaque instant t elles sont de même valeur mais en sens opposé. On récupère alors une force purement verticale de valeur $F(t) = M_{exc} \omega^2 \sin(\omega.t)$ avec : ω , la vitesse angulaire des masses et M_{exc} : la somme des moments d'excentricité.

L'étrier de suspension :

L'étrier de suspension a un rôle important dans le système car il filtre toutes les vibrations générées dans le carter vibrant par l'intermédiaire d'élastomères. Il évite ainsi de transmettre les oscillations à la grue qui supporte tout le système. De plus son poids, il participe à l'augmentation de la masse du système et donc à l'augmentation de l'effort vertical nécessaire pour enfoncer le pieu.

Le casque :

Le casque est solidaire du carter vibrant, il suit le même mouvement que celui-ci. Suivant le type de profilé à foncer, on pourra choisir entre une pince et un casque. Enfin, le casque doit être dimensionné par rapport à la puissance du vibreur.

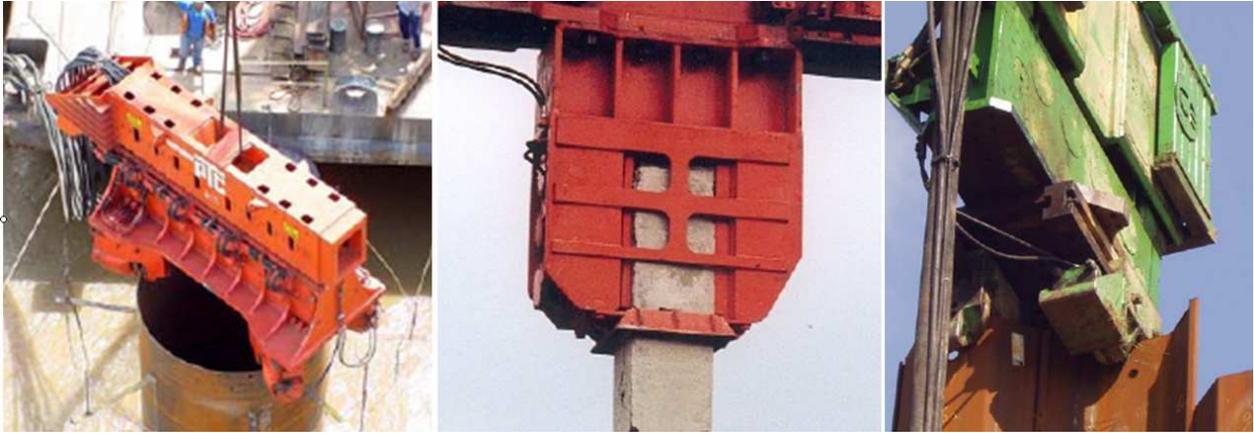


Figure 08 : Exemple de type de casques

Le terme pieu comprend les profilés, les palplanches, les pieux tubulaires aussi bien en acier qu'en béton ou en bois. Le vibrofonçage permet de foncer aussi bien en surface que sous la mer.

Toutes les géométries de pieu sont envisageables car il suffit pour chaque modèle de sélectionner la pince adaptée pour réaliser l'opération.

c) Notions de refus

Le refus du vibreur est souvent défini lorsqu'en 5 minutes de vibrofonçage l'enfoncement du pieu ou du profilé est inférieur à 25cm.

2. Fiche comparative des deux méthodes : Vibrofonçage/Battage

En Généralités :

Avantage du vibrofonçage par rapport au battage :

- plus économe en énergie
- plus rapide de mise en œuvre
- permet de faire des économies substantielles par rapport au battage
- bien indiqué dans les terrains sableux, saturés ou non, et dans les terrains alluvionnaires
- soumet, en partie courante, l'acier -ou le matériau constitutif du pieu- à des contraintes qui restent
- nettement inférieures à sa limite élastique

Désavantage du vibrofonçage par rapport au battage :

- contrôle moins étroit de la portance lors de la mise en place d'éléments porteurs
- moins performant que le battage dans les terrains ayant une forte résistance à la pénétration

En fonction de la typologie du sol rencontré

En ce qui concerne le battage

Sols favorables au battage :

- Les sols meubles tels que vases et tourbes
- Les dépôts lâches de sables grossiers ou moyens
- Les graviers sans inclusions rocheuses
- Plus généralement, les sols humides, immergés ou complètement saturés

Sols défavorables au battage :

- Les dépôts denses de sables fins, moyens ou grossiers
- Les argiles dures et les couches rocheuses tendres à moyennes
- Plus généralement, les sols secs.

En ce qui concerne le vibrofonçage

Sols favorables au vibrofonçage :

- Les sols composés de sable à grains arrondis et de graviers
- Les sols mous
- Les sols humides, immergés ou complètement saturés.

Sols défavorables au vibrofonçage :

- Les matériaux à grains anguleux
- Les sols compacts
- Les sols secs
- Les sous-sols granulaires préalablement compactés par les vibrations

La distinction entre le domaine d'utilisation du vibrofonçage et le domaine d'utilisation du battage est difficile à faire, notamment parce que ces domaines sont proches et ont parfois des caractéristiques communes. Ce sont les principales méthodes de fonçage, mais il en existe d'autres telles que le vérinage par exemple.

3. *Présentation succincte du Projet National Vibrofonçage*

Ce projet de recherche est coordonné par l'IREX, Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation en génie civil, et remonte à 1999. L'aboutissement de ce projet est prévu lors des « journées de valorisation du vibrofonçage », les 21 et 22 septembre 2006 à la SMABTP (15^{ème}, Paris).

De nombreuses entreprises sont partenaires de ce projet et, parmi elles, de grands groupes tels que la SNCF, Bouygues, GTM, ICE, PTC, ARBED mais également des ports autonomes (Dunkerque, Le Havre, Nantes, Bordeaux), des organismes de recherches (CETE, CSTC...) et l'INSA de Strasbourg.

Suite au « Projet National TUBA » qui a permis la mise en place d'un procédé de prévision et d'interprétation du battage de pieux, il a été envisagé de réaliser la même étude pour le vibrofonçage.

Les trois objectifs retenus pour ce projet ont été les trois axes de recherches suivants:

- La prévision du vibrofonçage des profilés (pieux, palplanches),
- L'estimation de la capacité portante des pieux vibrofonçés,
- La prévision des vibrations générées dans le sol par le vibrofonçage.

Les phases de recherches se sont appuyées sur 4 chantiers expérimentaux :

- Site de Montoir de Bretagne
- Essais sur pieux de support de passerelle (Dunkerque)
- Sable saturé dans l'estuaire de la Seine
- Argiles des Flandres (Marseille)

Les recherches ont été divisées en six phases d'études :

Phase 1 Enquête sur les études et recherches effectuées sur le vibrofonçage et état des pratiques du vibrofonçage.

Phase 2 Constitution d'une banque de données sur le vibrofonçage des pieux et palplanches.

Phase 3 Adaptation de logiciels de prévision du vibrofonçage et ré analyse des données recueillies.

Phase 4 Réalisation d'essais de mise en place de pieux, d'essais de chargement statique de pieux et de mesures des vibrations dans le sol générées par le vibrofonçage, afin d'améliorer la compréhension du vibrofonçage et le calage du logiciel.

Phase 5 Validation d'un logiciel de prévision du vibrofonçage.

Phase 6 Rédaction des recommandations sur la prévision du vibrofonçage, sur l'évaluation de la capacité portante des pieux vibrofonçés et sur les vibrations générées par le vibrofonçage, et valorisation des résultats.

Pour mon Projet de Fin d'Etudes, je me suis concentré sur la 6^{ème} phase de ce projet, contenant la partie des nuisances à l'environnement (vibrations, tassements). Je me suis donc rapproché de Frédéric ROCHER-LACOSTE (LCPC) en charge de cette partie. Ensemble, nous avons mené plusieurs mesures de vibrations et de tassements sur site SNCF.

B. La problématique SNCF et objectifs de l'étude

Les effets non désirés du fonçage sont liés à la transmission des vibrations dans le sol.

On peut identifier trois sujets susceptibles de souffrir de ces nuisances : l'homme, les sols, les structures.

Pour les structures, on peut distinguer celles comprises ou non dans les emprises SNCF. Par structures, on entend les voies ferroviaires, les immeubles d'habitation, les ouvrages d'art, etc. Je me suis concentré sur les nuisances engendrées aux sols et aux structures.

La problématique de la SNCF vis-à-vis de ces méthodes de fonçage est de plusieurs ordres :

1. Identifier les nuisances et leurs origines
2. Quantifier ces nuisances
3. Savoir anticiper et minimiser leurs impacts

Cette problématique intervient au moment où les connaissances liées aux méthodes de fonçage s'accroissent. Des projets nationaux ont été lancés afin de mieux maîtriser les paramètres entourant la fonçabilité : le Projet National « TUBA » pour le battage et le Projet National « Vibrofonçage ».

Ce regain de connaissances pousse les acteurs ayant la nécessité du fonçage à s'intéresser aux recherches entreprises. Ainsi la RATP ou encore la SNCF multiplient les actions dans ce sens car les parties liées aux nuisances à l'environnement sont très peu renseignées.

La problématique de la SNCF peut se résumer en ces termes : spécifier une distance minimale au delà de laquelle aucun dommage ne peut avoir lieu et être à même de quantifier l'intensité des nuisances en dessous de cette distance.

Aurore LEJEUNE sous la tutelle de Daniel DUROT (entreprise Rincent BTP), a effectué en 2005 son mémoire de fin d'études de Master Géologie Géotechnique sur le thème de la «
Densification des sols causée par le vibrofonçage ». Préalablement, elle a conduit une analyse de risques et a identifié deux nuisances majeures : les tassements et les vibrations.

Dès lors, il me restait à compléter son étude, à quantifier ces nuisances, et à normaliser le suivi des phases de fonçage. Cela incluait des essais sur site ou en laboratoire.

La problématique étant établie, voici les objectifs du projet qui en découlent :

1. Etablir le potentiel de nuisances du vibrofonçage et faire le bilan des méthodes de prédiction existantes
2. Vérifier la véracité des méthodes de prédiction des nuisances sur site et vis à vis de sinistres répertoriés
3. Apporter à la norme interne SNCF concernant les engins mécaniques puissants (IN 1226) un supplément d'informations et une procédure guide pour le fonçage

C. Evolution du projet de recherche SNCF à travers ce PFE

Durant ce projet, une analyse des risques a été approfondie suivant différents types de sol. Un complément est apporté dans ce rapport et cible les sables lâches saturés comme étant les sols les plus défavorables concernant les risques de tassements.

Une campagne d'essais en collaboration avec le LCPC a été menée dans différents types de sols et les conclusions, tant au niveau des nuisances vibratoires que des tassements, sont détaillées ici. Des rapports établis dans le cadre d'« essais préalables » ont également été étudiés pour enrichir cette étude.

De réelles difficultés ont été rencontrées pour multiplier les études de sinistres. Les cas suffisamment renseignés et dont les causes sont directement imputables aux méthodes de fonçage sont en effet rares. Ce sont pourtant les seuls critères qui pourront valider les méthodes de prévisions établies avec les essais sur site.

Une approche bibliographique pourra cependant répondre à cette attente, des publications répertoriant des retours d'expérience ayant été identifiées.

Enfin, afin de pérenniser l'apport de cette étude, une publication sera réalisée dans le cadre des journées de valorisation du vibrofonçage sur le thème des réglementations existantes liées aux vibrations engendrées et un site Internet sera réalisé.

I. Nuisances vibratoires

A. Nuisances directes : les vibrations

1. Mécanisme des vibrations

Les vibrations produites durant les opérations de construction deviennent une préoccupation à partir du moment où elles peuvent perturber les hommes au sens large et engendrer des dommages sur les structures et les sols adjacents.

Les niveaux de vibrations perçus par les humains comme étant modérément irritants, sont typiquement bien au-delà des niveaux à partir desquels les structures sont endommagées. Plusieurs chercheurs ont établi que les humains sont plus sensibles aux vibrations que les structures. Les hommes peuvent globalement percevoir les vibrations au-delà de 0,25mm/s. Cela est approximativement 100 fois le niveau à partir duquel les dommages aux structures risquent, soit 25mm/s.

On peut distinguer deux classes à part parmi les sources de vibrations :

- Les explosifs (vibrations impulsionnelles)
- Les engins mécaniques puissants (vibrations intermittentes ou entretenues)

Les sources de vibrations telles que les engins de fonçage peuvent être rangées dans deux catégories distinctes :

- Les vibrations intermittentes ou répétées telles que les engins de battage dont la durée d'une émission (impulsion) est inférieure à 500 millisecondes
- Les vibrations entretenues ou continues : les vibreurs et les engins de battage dont la durée d'une émission (impulsion) est supérieure à 500 millisecondes.

Il est également nécessaire de prendre en compte les phénomènes de fréquence de résonance. Ainsi, il se peut que des vibrations entretenues soit plus défavorables que des impulsions brèves bien qu'étant d'amplitude bien plus élevée, du fait que la fréquence propre de l'ensemble sol-structure peut être atteinte.

L'énergie libérée par des explosifs est bien plus importante que l'énergie typiquement libérée par le fonçage. Par exemple, l'énergie libérée par 0,5 kg de TNT est de 5400kJ ce qui correspond entre 50 et 1000 fois l'énergie libérée par le fonçage de palplanches ou de pieux.

Le fonçage génère des ondes de compression et de cisaillement dans le sol et des ondes de surface majoritairement des ondes de Rayleigh. Ces ondes de surfaces contiennent 2/3 de la totalité de l'énergie libérée. Les ondes à hautes fréquences s'atténuent, elles, plus vite.

2. Réglementation / normes en vigueur

Pour pouvoir estimer l'impact des vibrations en amont d'un projet, il est nécessaire d'effectuer des essais sur site, et notamment mettre en œuvre plusieurs outils (vibreurs, marteaux...) afin de déterminer la solution technique la moins dommageable.

Les normes internationales comparées en annexe « Comparatif de normes internationales » concernent à la fois les vibrations intermittentes (transitoires) et continues.

Les objectifs de cette comparaison sont multiples :

- Avoir une vue globale des critères empiriques régissant les dommages liés aux vibrations
- Pouvoir juger le niveau de sécurité des normes françaises
- Savoir mieux appréhender les futurs niveaux imposés par l'Eurocode 3 partie 5
- Pouvoir justifier les précautions prises vis à vis des engins de fonçage
- Apporter une contribution à la réécriture de la norme interne IN1226 vis à vis des vibrations.

Au niveau SNCF, la norme IN1226 « Emploi d'explosifs et autres procédés spéciaux, Utilisation d'engins mécaniques puissants » régie les aspects vibratoires.

Elle est la traduction interne de la « Circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement », (1986), INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Que se soit en vibrations continues ou intermittentes, il apparaît que les seuils préconisés par la norme Française sont plutôt sécuritaires vis-à-vis de ses homologues.
- La norme Eurocode 3 est, elle, moins sévère que la norme française.
- Il est important de prendre du recul vis-à-vis de ces comparatifs tant les causes et critères d'évaluation du risque sont différents. Cependant, l'ordre de grandeur de ces seuils de probabilité d'occurrence de sinistres est un bon indicateur face à un phénomène, les vibrations, difficilement appréhendable.

Pays	Norme	Date d'application	<i>Paramètres pris en compte</i> Type de vibrations : I : Impulsionnelle; IP : impulsions périodiques; C : vibrations continues							
			Fréquence	Vitesse totale	Composante de la vitesse particulière	Distance	Type de terrain	Type d'édifices	Type de vibrations	Type d'activité
Allemagne	DIN 4150	1975	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
USA	USBN	1980	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
	OSM 817.67	1983	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Oui
Italie	UNI 9916	1991	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
Suisse	SN640312a	1992	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	I, C	Non
France	Circulaire du 23/07/1986	1986	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP, C	Oui
Portugal	NP 2074	1983	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	I	Oui
Espagne	UNE 22-381	1993	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
Suède	SS4604866	1991	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	I, IP	Oui
Australie	AS2187	1993	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Oui
Inde	CMRI	1991	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	I	Non
Angleterre	BSI5228	1997	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	IP, C	Non
	BSI7385	1993	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I, IP	Non
Ecosse	PAN50	2000	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	I,IP	Non
Brésil	NBR 9653	1983	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	I, IP	Non

Tableau 1 : Comparatif des critères d'évaluation des seuils de vibrations

Le critère de la fréquence de vibration est le plus communément partagé.

A noter que certaines normes, telle que la norme italienne, ne considèrent pas les vitesses particulières comme élément de mesure des vibrations, mais plutôt l'accélération particulière, comme en sismologie. Cependant, il est possible de jongler entre ces deux grandeurs par l'intermédiaire de diagrammes dits « tri-Log » ou encore par le biais de formules en connaissant la fréquence des vibrations émises dans le sol. Ces moyens de conversion sont détaillés ci-après.

Lorsque le critère retenu est celui des vitesses particulières, une nuance apparaît. En effet, l'onde de surface qui se propage engendre des déplacements dans les trois directions de l'espace, verticalement, longitudinalement et transversalement. Certaines normes prennent comme seuils de mesure le maximum de ces trois composantes, d'autres en prennent la moyenne géométrique.

Les comparatifs de ces différentes normes selon le type de vibrations qu'elles régissent (continues ou transitoires) sont présentés ci-après en figures 7 et 8.

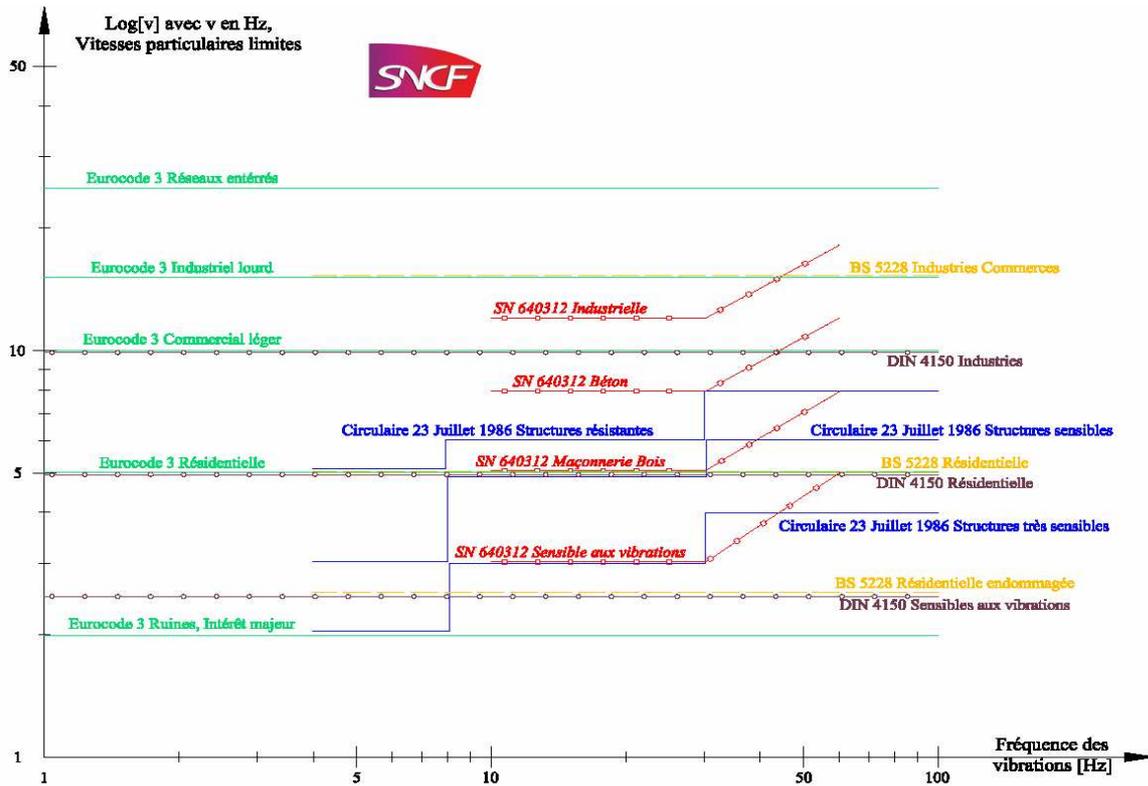


Figure 09 : Comparaison entre normes de vibrations continues

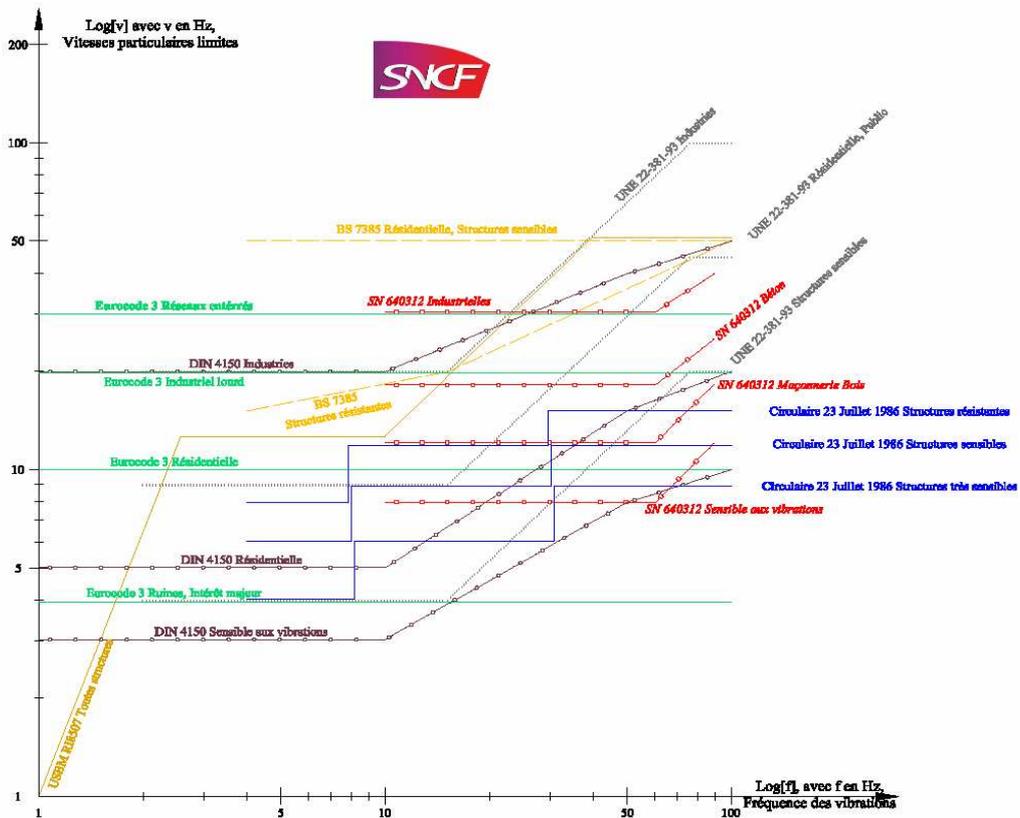


Figure 10 : Comparaison entre normes de vibrations intermittentes

3. Méthode de prévision, recherches entreprises

L'évaluation de l'atténuation des vibrations en fonction du type de sol rencontré est assez détaillée dans les normes et les littératures.. L'influence de la distance D sur la vitesse v est typiquement de la forme $v=K*D^{-\alpha}$ à travers un coefficient d'atténuation K. Le principal obstacle rencontré est l'évaluation de ce coefficient d'atténuation qui dépend du type de sol et du type de fonçage.

Certaines méthodes de prévision des vitesses particulières sont détaillées dans la littérature.

Une méthode de prévision des vitesses particulières est donnée dans la partie 5 de l'Eurocode 3 : « Pieux et palplanches ». Cette approche « informative » prend en compte l'énergie de l'engin de fonçage et la nature du terrain. En voici le détail :

$v = C * \frac{\sqrt{w}}{r}$ en mm/s avec	facteur dépendant de la méthode de fonçage et * C : des conditions de sol, [$\frac{m}{\sqrt{kg}}$] * r : distance radiale mesurée depuis la source avec $r \geq 5m$, [m] * w : énergie fournie par coup, [Joules].
---	--

Evaluation de l'énergie w fournie par cycle en Joules :

Pour le vibrofonçage :

$$w = \frac{P}{f}$$
 avec :

- * P : puissance du vibreur, [Watt]
- * f : fréquence du vibreur, [Hz]

Pour le battage :

$$w = m * g * h$$
 avec :

- * m : est la masse du mouton en chute libre, [kg]
- * g : accélération due à la pesanteur, = 9,81 [m/s²]
- * h : est la hauteur de chute, [m]

Valeurs types indicatives du facteur C selon les conditions de sol et de fonçage

Méthode de fonçage	Conditions de sol	Facteur C
Percussion	Sols cohérents très raides, matériaux granuleux denses, roche, remblai comportant des obstructions massives de grandes dimensions.	1.0
	Sols cohérents raides, matériaux granulaires moyennement denses, remblai compact.	0.75
	Sols cohérents meubles, matériaux granulaires meubles, remblai meuble, sols organiques.	0.5
Vibration	Toutes conditions de sol	0.7

On retrouve le fait que plus la fréquence est basse, plus les vitesses particulières sont importantes.

L'étude des seules vibrations ne suffit pas à délimiter l'ensemble des nuisances. Le degré de saturation du sol est un élément prépondérant non pris en compte par cette formule.

Remarque pratique :

Il est à noter que toutes méthodes de prévision des seuils de vitesses particulières doit prendre en compte les réalités du terrain. Par exemple, avant toutes interventions sur site, l'entreprise se doit de mener des essais préalables par des laboratoires habilités afin de s'assurer que le matériel qu'elle compte utiliser n'engendre pas de seuils de vitesses supérieurs à ceux imposés par la réglementation. Or il est fréquent de constater que certaines entreprises ne respectent pas l'emploi du matériel ainsi validé du fait de dysfonctionnements matériels la plus part du temps ou de gestion de stocks et de délais.

Il appartient donc au concepteur de projet d'anticiper ces aléas en prenant en compte un surdimensionnement du matériel initialement prévu.

4. Fiabilité et pertinence de la méthode de prévision de l'Eurocode 3

Afin de jauger la pertinence et le conservatisme de la règle citée ci-dessus, il convient de la comparer à un maximum d'essais réalisés sur site ou de rapport d'« essais préalables » existants.

Préalablement à toute comparaison, il est nécessaire de rappeler que plus un élément (pieu ou palplanche) est foncé dans le sol, plus les niveaux de vibrations seront élevés. Toute comparaison doit donc se faire avec les résultats obtenus dans les derniers mètres foncés.

Pour les vibrofonçeurs, nous nous baserons sur l'essai réalisé à Verberi. Il s'agissait de foncer des palplanches sur 5m de profondeur.

La courbe d'évolution de la vitesse particulière avec la distance la plus défavorable est détaillée en figure 5. On peut remarquer que la méthode de prévision proposée semble adéquate car tout en restant enveloppe quelque soit la profondeur de fonçage, elle reste suffisamment conservatrice.

Aucune comparaison faite jusqu'au moment de la rédaction (sur une 20^{ème} de rapport d'essais) de ce rapport n'a contredit cette conclusion

Pour le battage, les mesures représentées en figure 6 proviennent du rapport de mesure de l'entreprise Vibratex, rapport établi dans le cadre de la surveillance de battage pour suppression du PN42 à Fréjus. Il s'agissait de foncer des palplanches sur 12m de profondeur. Le type de sol se situe dans la classe « Sols cohérents raides, matériaux granulaires moyennement denses, remblai compact » ce qui donne un coefficient C de 0,75. Deux marteaux ont été utilisés : un marteau hydraulique IHC-S35 dans une plage d'énergie de 15 à 30kJ et un marteau diesel Delmag D30 utilisé vers les 80kJ.

Le rapport souligne que les niveaux maximaux en termes de vitesses particulières étaient indépendants de l'énergie de fonçage pour le marteau hydraulique.

De même, on peut remarquer ici que la méthode de prévision proposée semble adéquate car tout en restant enveloppe quelque soit la profondeur de fonçage, elle reste suffisamment conservatrice.

Il semble évident que ces comparatifs n'ont aucune valeur de généralité du fait du faible nombre de mesures étudiées. Cependant ils donnent une tendance qu'il faudra confirmer par la multiplication de rapprochements.

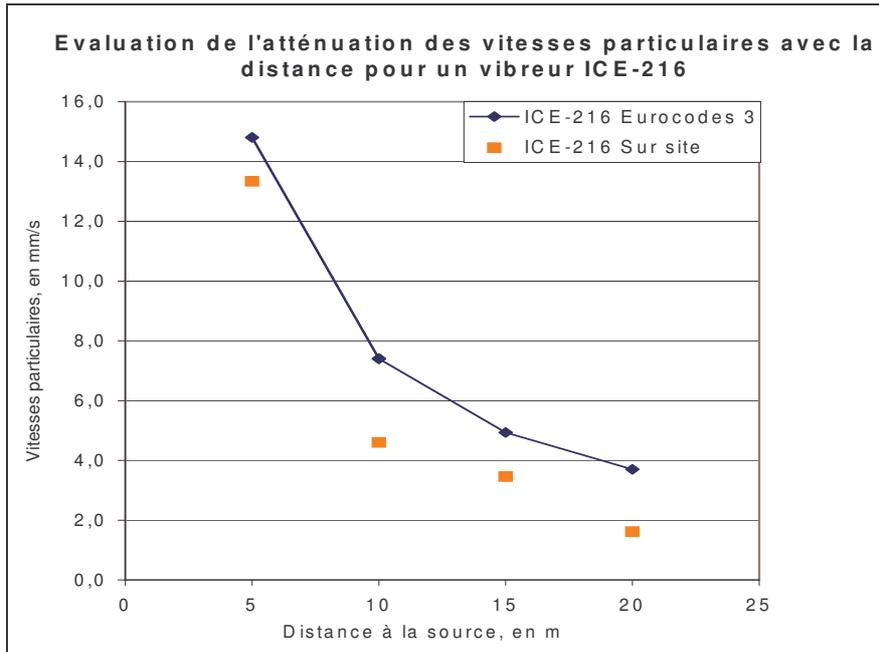


Figure 11 : Vibrofonçage méthode Eurocode 3 / mesures effectuées sur site

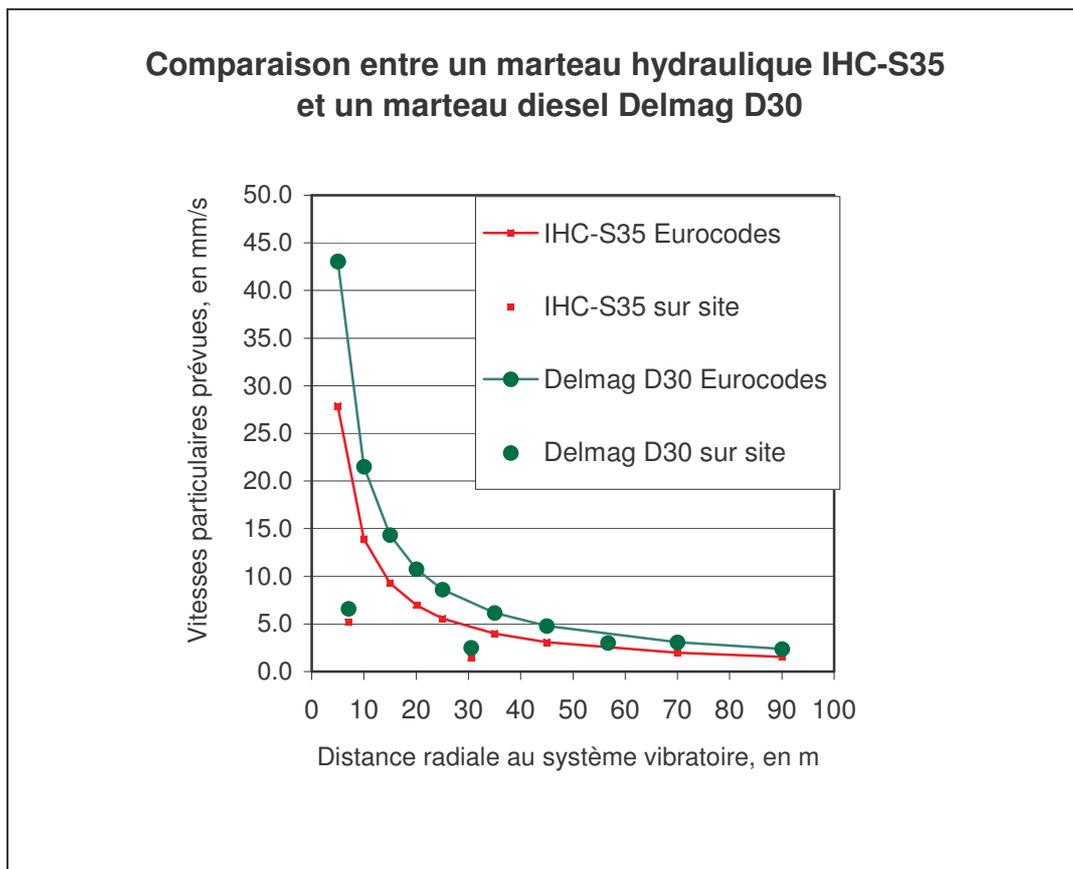
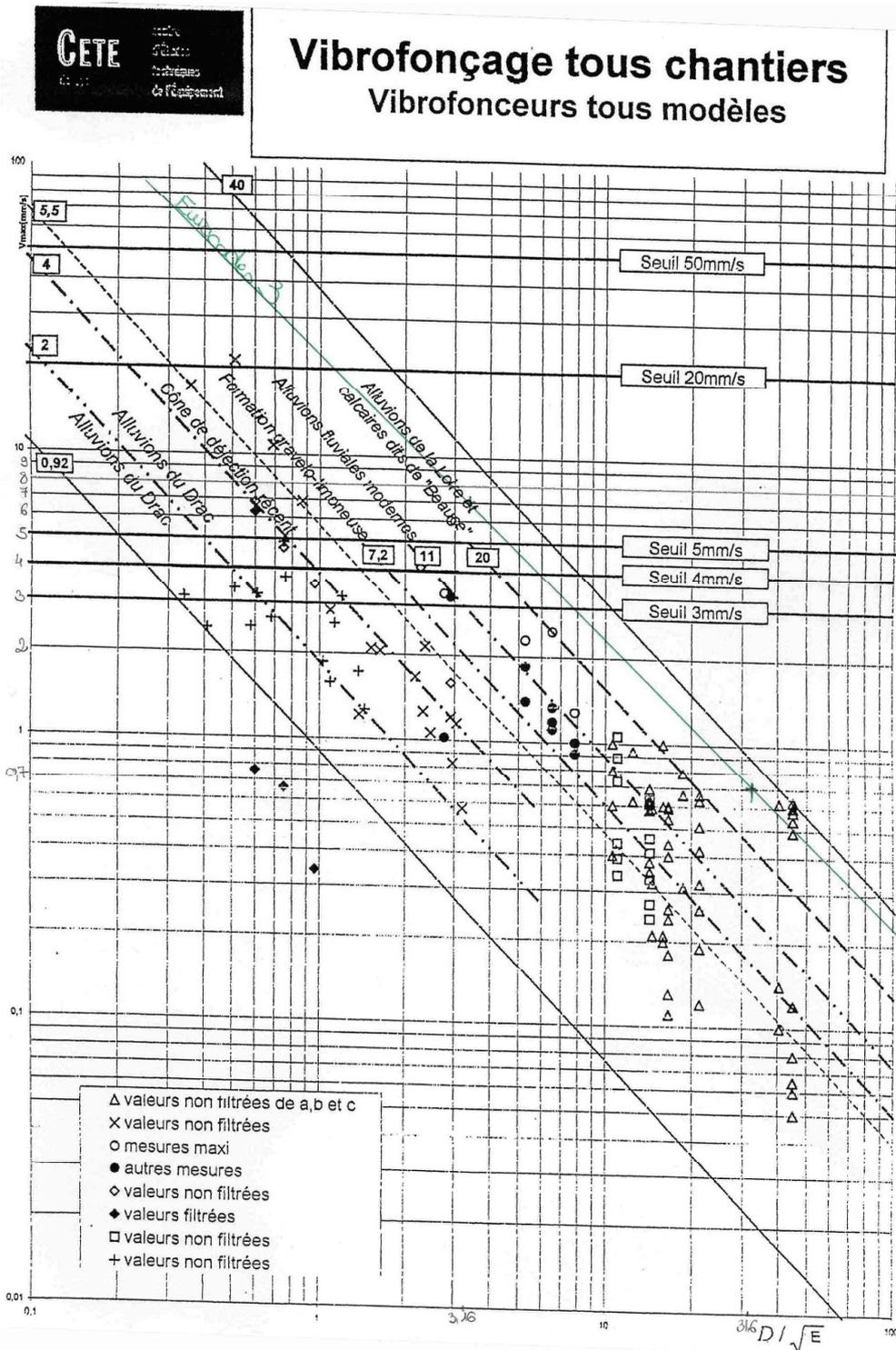


Figure 12 : Battage méthode Eurocode 3 / mesures effectuées sur site

Pour recouper la formule de l'Eurocode 3, j'ai obtenu de la part du technicien supérieur du CETE de Lyon, Jean-Pierre SARASAR, en charge du rapport « d'essais préalables » de vibrations sur le chantier de Vesoul, une fiche récapitulative d'une étude qu'il a réalisé sur une vingtaine d'année concernant les vibreurs (Pieux et Palplanches) et l'atténuation des vitesses particulières avec la distance en fonction des différents types de sols à partir de ses interventions sur sites. Sur cette fiche récapitulative, j'ai tracé la courbe représentative de l'Eurocode3 à partir de la configuration matérielle détaillée en B. Force est de constater que l'Eurocode3 est bien enveloppe.

Équation 1 : Comparaison entre les prédictions de l'Eurocode3 Partie5 et les mesures sur sites



B. Nuisances indirectes : les tassements

1. *Mécanisme des tassements*

a) Généralités

Le développement de surpressions interstitielles, éventuellement jusqu'à la liquéfaction, et la réduction volumique des sols soumis à des chargements cycliques sont l'expression du même phénomène, c'est à dire la tendance irréversible des particules du squelette du sol vers un assemblage plus dense lorsqu'il est soumis à des allers retours de contraintes de cisaillement.

En condition de drainage, la réduction de volume est immédiate. En conditions non drainées, la tendance à une réduction volumique se traduit par une augmentation de la pression interstitielle, de telle manière que les contraintes effectives sont réduites à des valeurs qui peuvent s'approcher de zéro. Il est alors nécessaire de laisser jouer la consolidation du sol pour permettre à la réduction de volume de s'opérer.

Il n'y a pas de règles à proprement parler qui régissent les tassements. Les risques sont pris en compte dans les vitesses particulières limites mesurées à proximité de l'élément foncé.

Plusieurs chercheurs ont mis au point des modèles de prévision des tassements prenant en compte l'accélération ou les vitesses particulières pour en déduire la densification ainsi engendrée. Cependant, tassements résiduels et vitesses particulières ne peuvent être totalement liés car si on prend l'exemple de sables lâches, plusieurs autres facteurs rentrent en compte tels que la densité ou encore l'indice des vides critique de ces sols.

Pour ce qui est de l'identification des causes de tassements, A.Lejeune a mis en évidence une analyse du risque en fonction du type de sol rencontré. De son étude, on peut retenir les points suivants :

- Les sols pulvérulents sont à peu près les seuls susceptibles d'exhiber des variations de volume sous sollicitations cycliques.
- Il existe une diminution du tassement avec l'augmentation de la densité relative.
- Contrairement à ce qui est usuellement admis, l'emploi d'un vibreur à hautes fréquences est plus défavorable vis-à-vis des tassements du fait d'un endommagement des sols plus important soumis à un nombre de cycle plus important.

b) Les causes des tassements

Les causes de tassements sont multiples et peuvent être rangées dans 5 catégories

<i>L'engin de fonçage</i>	<i>Les fondations de l'ouvrage subissant les nuisances</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Rythme • Précautions prises par l'opérateur • Position par rapport à la palplanche • Etat d'entretien du matériel • Puissance du vibreur • Vibreur / processus utilisé 	<ul style="list-style-type: none"> • Type • Profondeur • Rigidité • Fixité
<i>Le sol :</i>	<i>Les pieux et les palplanches :</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Irrégularité / Obstacles non-détectés • Blocs de roche • Inclusions • Canalisations • Réseaux • Fondations anciennes • Topographie de la surface / Stratification • Niveau des nappes (état sec ou saturé) • Type de sols : (Plus de risques pour les sols pulvérulents ou faiblement cohérents (sables, graves, graviers)) • Densité du sol (Plus de risques pour les sables lâches à moyennement denses) 	<ul style="list-style-type: none"> • Type • Dimensions • Frottement des serrures • Tolérance d'installation • Qualité (raideur) • Longueur de la fiche / profondeur
	<i>L'ouvrage subissant les nuisances</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Forme structurale • Matériaux • Condition • Orientation • Contenu

2. *Réglementation, normes en vigueur*

a) Impacts des nuisances induites par le fonçage

Les sources de risques de tassements pour les sols sont soit la densification, l'endommagement sous chargement cycliques ou la liquéfaction suivant leurs types.

La réorganisation des grains dans le sol peut avoir lieu pour les sols pulvérulents. La liquéfaction peut apparaître pour certains sols cohésifs. L'endommagement sous chargement cyclique peut avoir lieu pour certains types de sols tels que les loess.

Le risque majeur de tassements réside principalement pour les sables lâches saturés.

Les effets des vibrations sur les structures vont de l'endommagement esthétique à la ruine des ouvrages.

Les défauts admissibles induits aux voies SNCF sont régis par la norme interne IN 1895, "Normes de maintenance de la géométrie et d'écartement pour lignes classiques".

Les dommages aux voies induits par les tassements peuvent être de 4 types, détaillés dans le tableau n°1, page suivante. Ces dégradations sont obtenues à cause de déplacements qui peuvent être à la fois horizontaux et verticaux.

Les dommages aux voies sont plus défavorables que les dommages aux ouvrages. En effet, les déraillements de trains sont dus à des défauts de voies de l'ordre du centimètre voir du millimètre selon la vitesse de circulation. Dès lors, si on prescrit les rails comme référence en termes de valeurs maximales admissibles, on se place du côté de la sécurité pour tous autres types de structures.

Cependant, on doit également tenir compte de la capacité de réparation associée. Il est plus facile de rembourrer un talus sous voies que de résoudre un problème de tassement sous un ouvrage d'art.

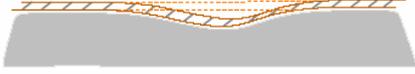
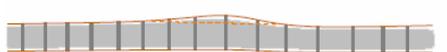
Types de dommages aux voies en zone courante et tolérances associées selon la vitesse de circulation v Ecart Mini pour : 160km/h < v ≤ 220km/h Ecart Maxi pour : v ≤ 60km/h		
Type de déplacement	Ecart admissible	Schéma type
Déplacements verticaux (tassements ou soulèvements)	Min : 6mm Max : 21mm	nivellement longitudinal NL 
	Min : 6mm Max : 18mm (Sur la base de 3m)	nivellement transversal NT 
Déplacements horizontaux	Min : 6mm Max : 20mm	dressage D 
	Min : 6mm Max : 22mm	écartement EC 

Tableau 2 Type de dommage sur voies ferroviaires

Afin de cerner les réglementations en vigueur, il était nécessaire de se pencher non seulement sur ce qui est mentionné en France mais également sur ce qui l'est à l'étranger. A. Lejeune avait détaillé et résumé les normes et recommandations françaises et j'ai de mon côté élargi le panorama aux normes étrangères.

Il en résulte que très peu de recommandations en termes de tassements pour les engins de fonçage existent actuellement et aucune règle générale n'est établie. La majeure partie du temps il est fait mention du risque et de ses causes probables.

L'Eurocode 3 stipule par exemple dans sa partie 5 que :

« Lorsque des palplanches étroites pourvues d'angles vifs entre l'aile et l'âme ou des palplanches à profil creux ont été foncées dans des terres argileuses, l'argile peut se trouver emprisonnée dans la section et laisser un trou béant important dans le sol, ou, dans le cas d'un sol plus mou, entraîner l'argile environnante vers la palplanche lors de l'extraction.

Le retrait d'une file de palplanches dans ces conditions peut provoquer des tassements importants de part et d'autre du rideau extrait.

Les effets peuvent être réduits par un remplissage des espaces vides (par exemple avec un coulis de ciment) au fur et à mesure de l'extraction des palplanches »

Cependant, une recommandation existe dans la norme hollandaise CUR 166 datée de octobre 2005, et elle préconise de considérer que les tassements liés aux vibrations peuvent avoir lieu dans un cône à partir de la pointe de l'élément foncé, d'inclinaison 45°, et donc formant à la surface un cercle de rayon égal à la fiche. Cette norme est schématisée en annexe : « Prévision des tassements ». De l'avis des professionnels, elle est très conservatrice.

3. Méthode de prévision, recherches entreprises

La norme SNCF préconisait encore au mois de janvier 2006 une distance minimale de 50m qui avait été décidée arbitrairement. Cette valeur correspondait, pour ceux qui l'ont imposé, à la distance empirique minimale à partir de laquelle, en sismique d'explosifs, on observe une atténuation totale du signal en surface. Suite aux travaux effectués dans le cadre de ce projet, la direction des ouvrages d'art a décidé de ramener la distance minimale de sécurité vis-à-vis du vibrofonçage, actuellement de 50m, à 30m.

Consciente de la marge de sécurité encore surabondante qu'elle impose, en attente des conclusions de ce projet (notamment suite au retour d'expérience qu'il me faudra établir sur un site particulièrement sensible près de Marseille) et des journées de valorisation du vibrofonçage en septembre, la SNCF se réserve de modifier cette nouvelle limite de 30m.

Une identification des causes et du mécanisme de densification des sols seront d'abord présentés dans ce chapitre. Plusieurs approches de prédiction des potentiels de densification seront montrées par la suite. Une proposition d'évaluation des risques de tassement sera élaborée en fin de rapport. Cette proposition devra par la suite être confirmée par les retours d'expériences sur site mais également par les journées d'information ayant lieu sur le thème du vibrofonçage au cours du mois de septembre.

a) Prévisions des tassements

Comme il a été montré plus en amont, les tassements horizontaux peuvent être tout aussi voire plus nuisibles que les tassements verticaux.

Il existe des prédictions qui évaluent des cônes de tassements au-delà desquels aucun tassement n'a lieu. Ces cônes prennent en compte tous les types de tassements, verticaux et horizontaux. La forme du cône est liée au fait que la densification du sol a lieu à la proximité de l'élément foncé, dans un cylindre autour de celui-ci.

Il est à noter que si des éléments ont été foncés préalablement dans le sol, les risques de tassements supplémentaires sont minimisés.

L'ordre de fonçage des pieux est également important. Il est préférable de foncer tout d'abord les pieux les plus proches des lignes ferroviaires ou des ouvrages afin de minimiser les mouvements latéraux différentiels.

Tout le but de cette étude est de savoir si lors de sinistres dont la cause a été directement reliée à une réorganisation de sol suite à une émission de vibrations, les critères présentés plus loin auraient pu prédire ces dommages.

Le seul sinistre SNCF répertorié et suffisamment renseigné est celui du viaduc de Bezons – Bras de Marly. Il a clairement pu être établi dans ce cas que les vibrations étaient à l'origine des tassements de part un suivi vibratoire et un suivi de nivèlement pendant les phases chantier. Sur les plans d'intervention de cet ouvrage, les piles qui ont subi des tassements se situaient dans un cercle défini par un cône de hauteur égale au refus et de pente égale à $2v/1h$.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur la question des tassements induits par les vibrations et plus particulièrement sur les risques induits par les engins mécaniques puissants dont font partie les engins de fonçage (vibreurs, marteaux), tout particulièrement de nombreux chercheurs du Nord de l'Europe (Finlande, Norvège, Pays-Bas...). Cela tient du fait que dans les pays d'Europe du Nord, les sols sont majoritairement constitués de sables, type de sols sensibles aux tassements.

Parmi ces chercheurs on peut nommer K.R. MASSARSCH de l'université de (Suède), Piet MEIJERS et A.F. VAN TOL de l'université Geodelft (Pays-Bas) avec lesquels j'ai pu m'entretenir.

Plusieurs chercheurs ont essayé d'établir des modèles de prévision des tassements en fonction du type de sol, seulement le problème est assez complexe à modéliser du fait du nombre de paramètres qui rentrent en ligne de compte. Un constat semble assez partagé : l'intensité des tassements est à peu de choses près fonction de l'inverse de la racine carrée de la distance.

Proposition de P.MEIJERS

Piet MEIJERS, dans sa thèse sur la densification des sables, a entrepris de faire des essais afin de mettre en place un modèle de modélisation des tassements et donc, en bout de chaîne, un programme de prévision.

Ses essais grandeur nature dans des sables ont montré que la densification était limitée pour la plupart des cas à une surface de rayon 0.5 et 1.0m à partir de la palplanche vibrofoncée.

Pour son étude, il ne s'est concentré que sur le sable.

Selon lui, les effets du vibrofonçage dans les argiles ne sont pas encore déterminés bien que les fabricants affirment qu'il n'y a pas de densification dans les tourbes et argiles. Il est par contre établi que la cohésion restreint la densification.

Une caméra à haute-vitesse peut également être utilisée pour mesurer la propagation des ondes à la surface : connaissant le nombre d'image par seconde, il est possible de déduire la fréquence des vibrations mais également leurs amplitudes. Dans sa thèse « Observation on densification of soil during vibratory sheet piling » (2005), P.MEIJERS a observé que des ondes P étaient émises à des amplitudes plutôt élevées et que celles-ci s'atténaient très rapidement avec la distance. A quelques décimètres du système vibratoire, le mouvement ne pouvait déjà plus être distingué.

Proposition de MASSARSCH

L'évaluation des tassements engendrés par le vibrofonçage peut être approchée à contre sens. En effet, le vibrofonçage est également utilisé comme moyen de compaction de sols et dans ce cas les tassements sont désirés. Cela ouvre alors une autre piste pour cette étude car la vibrocompaction est bien plus renseignée que ne l'est le vibrofonçage. On peut donc déduire à partir des rendements de compaction répertoriés dans les documentations constructeurs des règles pour le vibrofonçage.

A partir de l'expérience acquise en termes de vibrocompaction, MASSARSCH a établi une règle simple qui permet en amont des projets de déterminer les risques de tassement.

Il propose une estimation qui enveloppe la zone d'occurrence de la densification sous chargement cyclique dans un cône de sommet situé à la pointe de l'élément foncé et formant en surface un cercle de rayon égal à $L/2+3D$, où L représente la longueur au refus de l'élément inséré dans le sol et D sa grandeur caractéristique la plus grande (rayon pour un pieu, largeur transversale pour une palplanche).

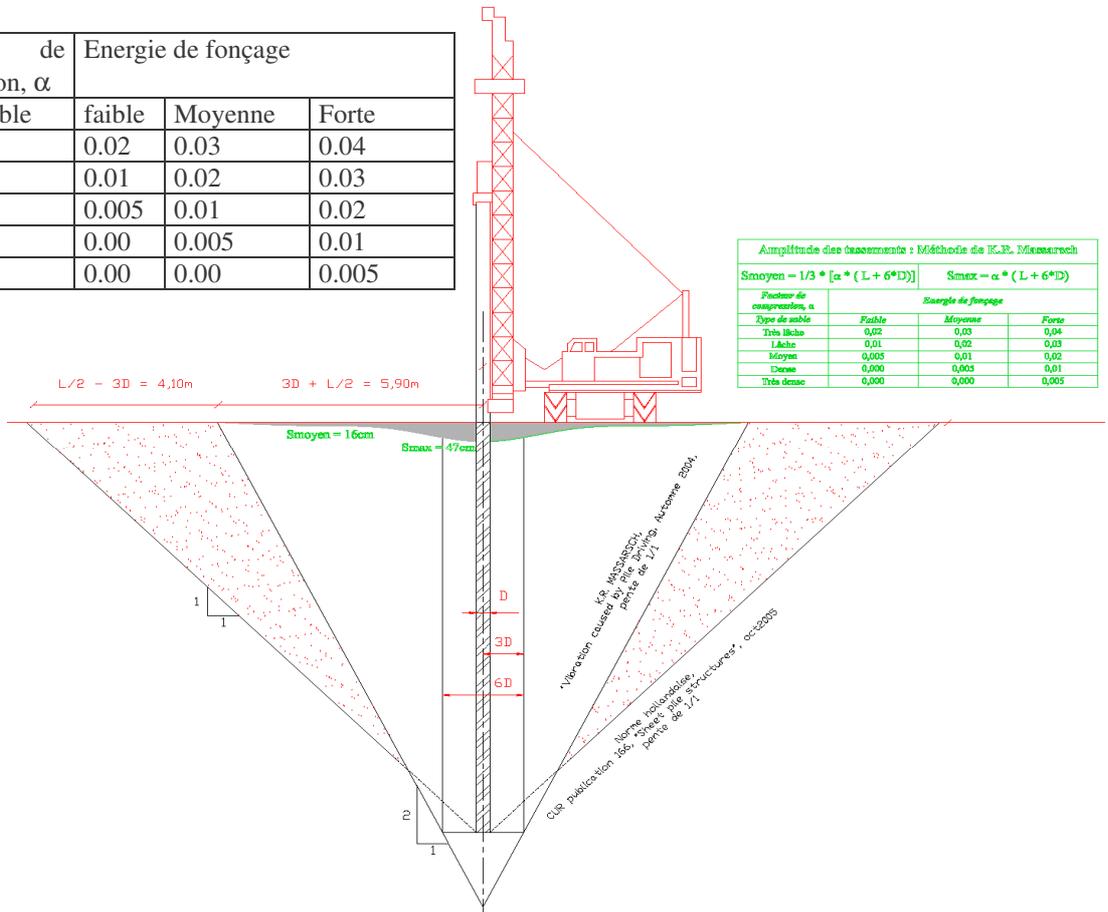
Dans ce cône, il estime l'intensité moyenne et maximale des tassements à l'aide des formules suivantes en prenant pour α les valeurs dans le tableau ci après. De plus, il remarque qu'une zone de forte densification est établie dans un cylindre de rayon égale à 3 diamètres du pieu.

Cette règle, qui a pour avantage d'estimer l'intensité des tassements, est schématisée en annexe : « Prévision des tassements ». Elle ressemble à la norme hollandaise CUR 166. L'avis de son auteur est que cette prédiction reste toute fois très sécuritaire.

$$s_{\max} = \alpha * (L + 6 * D); \quad s_{\text{moy}} = \frac{\alpha * (L + 6 * D)}{3}$$

Facteur de compression, α	Energie de fonçage		
	faible	Moyenne	Forte
Type de sable			
Très lâche	0.02	0.03	0.04
Lâche	0.01	0.02	0.03
Moyen	0.005	0.01	0.02
Dense	0.00	0.005	0.01
Très dense	0.00	0.00	0.005

Amplitude des tassements : Méthode de K.R. Messersch			
Smoyen = 1/3 * [$\alpha * (L + 6 * D)$]		Smax = $\alpha * (L + 6 * D)$	
Facteur de compression, α	Energie de fonçage		
	faible	Moyenne	Forte
Type de sable			
Très lâche	0.02	0.03	0.04
Lâche	0.01	0.02	0.03
Moyen	0.005	0.01	0.02
Dense	0.000	0.005	0.01
Très dense	0.000	0.000	0.005



Proposition de R.A.P. Bement et A.R. Selby

Ne pouvant mener des essais in-situ pendant la courte durée de mon projet, je me suis référé à la littérature existante pour confirmer les premières avancées établies.

Un ouvrage fait référence dans la reproduction in-situ des vibrations engendrées lors de phases de vibrofonçage. Il s'agit de "Compaction of granular soils by uniform vibration equivalent to vibrodriving of piles", publié dans "Geotechnical and Geological Engineering", Volume 15, Number 2, 1997, pp. 121-143(23) par R.A.P. Bement et A.R. Selby.

Ces deux chercheurs ont mené une étude en laboratoire pour identifier la réduction de volume d'une gamme de sols granuleux en réponse à des vibrations uniformes. Le but de ces tests était de quantifier le potentiel de tassement par compaction des sols granuleux dû aux vibrations typiquement de l'ordre de celles que l'on observe lorsque l'on fonce ou l'on extrait des pieux ou des palplanches à l'aide de vibrofonçeurs.

Les conditions in-situ ont été reproduites dans un laboratoire par des vibrations dans une cellule de Rowe contenant un échantillon de sol. Cela permettait de contrôler les contraintes appliquées durant les vibrations. Les tests ont été conduits dans 9 sols granuleux différents, du sable à du gravier sableux fin à moyennement fin. Les échantillons de sables ont été préparés à une densité relative minimale, généralement dans un état saturé, mais également sec ou en parti saturé.

Chaque échantillon a été consolidé à des contraintes effectives sélectionnées entre 10 et 100kpa. Ensuite, il était vibré verticalement avec des incréments d'accélération contrôlés, sous condition de drainage libre et de maintien de la contrainte de confinement. La réduction dans l'échantillon était mesurée de manière continue.

Les résultats ont montré que même dans les échantillons de petite taille et drainés, la réduction totale de volume n'était atteinte seulement qu'après de nombreuses minutes, bien que le phénomène ait été rapidement constaté.

Les tendances des résultats qu'ils ont obtenus rejoignent les premières constatations empiriques du premier rapport :

- Plus le terrain est consolidé, plus la compaction vibratoire engendrée est faible.
- Les sols saturés ont un plus grand taux de compaction que les sols secs ou partiellement saturés.
- Plus la fréquence des vibrations augmente, plus le taux de compaction est faible. Cependant, ils constatent que la fréquence influence peu la compaction.

R.A.P. Bement et A.R. Selby ajoutent qu'un sable peu uniforme montre une meilleure compaction qu'un sable plus uniforme.

Approche de l'étude par le biais d'accélération particulières

Il est difficile de prédire, en phase avant-projet, le potentiel de densification et donc de tassements suivant le type de sol rencontré. Il me fallait donc approcher le problème différemment.

Il existe dans la littérature des critères limites à partir desquels l'apparition de tassements est jugée possible à proximité de l'élément foncé. Ces critères sont donnés sous la forme d'accélération particulières, exprimées en m/s^2 ou encore en multiples de l'accélération gravitationnelle « g », ($g \approx 9.807m/s^2$).

Les vibrofonçeurs entraînent des vibrations dont l'accélération se situe typiquement dans une gamme de 0.02g à 1.0g.

Rappelons à ce stade que l'intérêt premier de la SNCF est d'édicter une distance à partir de laquelle tout vibrofonçage ou battage est interdit et d'être à même de quantifier à l'intérieur de cette distance les tassements qui s'y produisent.

Pour parvenir à la grandeur « distance », il existe des relations et des abaques pour transposer une accélération particulière en terme de vitesse particulière (voir pages suivantes).

Pour obtenir une distance à partir de la vitesse particulière « limite » correspondante, il est possible de passer par le biais de formules de prédiction telles que celle donnée dans l'Eurocode 3, Partie 5 (voir pages suivantes) qui estime la vitesse particulière à une distance D du système vibratoire en fonction du type de sol et de l'énergie délivrée par coup par l'engin de fonçage.

Sachant que cette formule est déjà enveloppe et donc conservatrice, la distance obtenue comporte un facteur de sécurité non négligeable.

Plusieurs résultats ont été établis dans ce domaine.

- Lacy et Cloud dans « Settlement from pile driving in sand » ont établi après une analyse de 19 cas de tassements avérés, principalement dus à l'usage de marteaux hydrauliques, que dans les sables lâches saturés d'une densité relative inférieure à 50%, le critère de 2.5mm/s était un niveau suffisamment représentatif du risque d'apparition de tassements conséquents.
- Clough et Chameau ont remarqué, en 1980, dans « Measured effects of vibratory sheetpile driving », que des vibrations engendrées à une accélération supérieure à 0.05g pouvaient entraîner dans les sables lâches non uniformes des tassements dynamiques non négligeables à proximité du système de fonçage.
- R.A.P. Bement et A.R. Selby dans « Compaction of granular soils by uniform vibration equivalent to vibrodriving of piles », 1997, ont établi que la compaction débute entre 0.2 et 0.4g puis s'accroît nettement quand l'accélération excède 1g .
Qui plus est, la densification se fait à des profondeurs limitées et ne dépassant pas 10m en deçà de la surface. Selon eux, la compaction est improbable au-delà d'une distance de 5m du système vibratoire à moins qu'une liquéfaction répandue n'ait lieu.

Partant de ces ordres de grandeur, il est possible de remonter à un critère en termes de distances limites d'apparition des tassements.

Prenons une application numérique la plus défavorable possible afin d'expliquer ce raisonnement :

- Les fréquences de vibrations des vibreurs sont typiquement de l'ordre de 20 à 40 Hz. Nous prendrons la borne inférieure de cette gamme soit $f=20\text{Hz}$.
- La puissance des centrales hydrauliques est typiquement de l'ordre de grandeur $P=500\text{kW}$.

Approche de Clough et Chameau : accélération limite = 0.05g

- A partir d'une accélération limite de 0.05g, soit selon les formules :
 $V = Ag / (0.000641 * f) = 0.05 / (0.000641 * 20) = 3.9 \text{ mm/s}$

- Le facteur C de conditions de sol et de fonçage est de 0.7 quel que soit le type de sol pour du vibrofonçage

$$D \geq C * \frac{\sqrt{w}}{V_{\max}} = 0.7 * \frac{\sqrt{\frac{500 * 10^3}{20}}}{3.9} = 28.4 \text{ soit } D \geq 30\text{m}$$

On retrouve le même ordre de grandeur que la valeur proposée par Lacy et Cloud de 2.5mm/s. On retombe également sur la distance actuellement en vigueur à la SNCF

Approche de Bement et Selby: accélération limite = 0.2g

- A partir d'une accélération limite de 0.2g, soit selon les formules :
 $V = Ag / (0.000641 * f) = 0.2 / (0.000641 * 20) = 15.6 \text{ mm/s}$

- Le facteur C de conditions de sol et de fonçage est de 0.7 quel que soit le type de sol pour du vibrofonçage

$$D \geq C * \frac{\sqrt{w}}{V_{\max}} = 0.7 * \frac{\sqrt{\frac{500 * 10^3}{20}}}{15.6} = 7.09 \text{ soit } D \geq 7\text{m}$$

On retombe sur la distance préconisée par Bement et Selby d'environ 5m.

Ces deux applications doivent être prises et étudiées avec précaution. Elles sont en effet très sécuritaire du fait que les valeurs de base données par les chercheurs en terme d'accélération contiennent déjà un facteur de sécurité, qu'un autre facteur de sécurité est ajouté en utilisant la formule conservatrice de l' Eurocode3 et qu'enfin c'est la combinaison « matériel » la plus défavorable qui a été étudiée.

La première valeur de 30m correspond à l'approche de Clough et Chameau en 1980 or à l'époque les vibreurs à excentricité variable n'étaient pas encore à disposition pour diminuer les phénomènes d'ébranlement. Qui plus est, l'étude a été menée en grande partie avec des marteaux hydrauliques ce qui pose encore une fois la question de la supériorité des nocivités engendrées par le battage.

La seconde valeur proposée par Bement et Selby me semble plus adéquate car on retombe sur des valeurs correspondant à celles données par les règles empiriques, c'est à dire la longueur de l'élément foncé soit entre 10 et 20m.

Les formules ou abaqes de correspondance entre accélérations et vitesses évoqués précédemment ont un intérêt plus large. En effet, certains équipements sensibles tels que des guérites de signalisation comportant des outils informatiques ou électroniques utilisent des seuils limites exprimés en termes d'accélération.

Vitesses et déplacement

$$V = \pi * f * D$$

Accélération et déplacement

$$A = 2 * \pi^2 * f^2 * D$$

$$Ag = (2 * \pi^2 * f^2 * D) / g$$

Si D est en mm:

$$Ag = (2 * \pi^2 * f^2 * D) / 9807 = 0.00201 * f^2 * D$$

$$A = 2 * \pi * f * V$$

$$Ag = (2 * \pi * f * V) / g$$

Si V est en mm/s :

$$Ag = (2 * \pi * f * V) / 9807 = 0.000641 * f * V$$

Accélération et vitesse

$$A(\text{dB}) = 20\text{Log}(A/A0); V(\text{dB}) = 20\text{Log}(V/V0)$$

Vitesse ou accélération en décibels:

Avec A= accélération, A0 = accélération de référence, V = vitesse Vo= vitesse de référence

Tableau 3 : Formules liant les grandeurs vibratoires entre elles

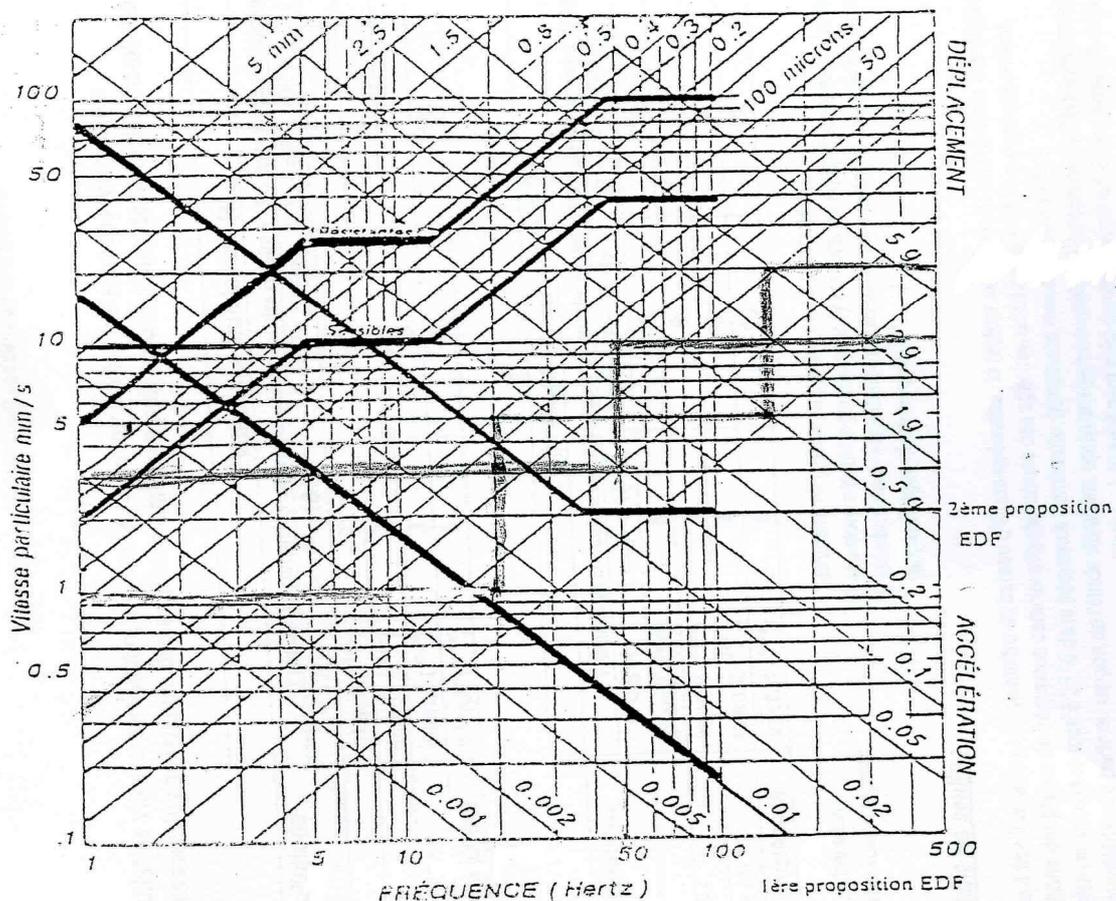


Figure 13 : Abaque liant accélérations particulières, fréquence et vitesses particulières

4. *Fiabilité des méthodes préconisées ici*

Arcelor, dans son « Piling handbook », Chapter12: « Noise and vibration from piling operations », 8th Edition, January 2005 stipule une distance de 5m au-delà de laquelle tout tassement est improbable sauf s'il existe des risques de liquéfaction répandue sous chargement cyclique.

Une autre approche du problème consiste à envisager le vibrofonçage comme un outil de renforcement des sols. Cette technique de fonçage est ainsi également utilisée en vibrocompaction, et dans ce cas, les tassements ne sont plus craints mais bien désirés.

Dans l'étude exploratoire de l'IREX dans le cadre du Projet National, « Vibrofonçage des pieux et palplanches », Opération du Plan Génie Civil de Mars 1998, il est mentionné (2.5.2) un bilan des méthodes de densification des sols par vibrofonçage. Il est ainsi écrit :

« L'espacement des points de densification varie, selon les techniques employées, entre 1 et 3m, rarement 4-5m. Au-delà de cette distance, l'énergie transmise par unité de volume de sol n'est pas suffisante pour déstructurer le sol, ce qui exclut toute possibilité de réarrangement des grains, donc de tassement ».

Ces 4-5m sont bien situés dans les différents cônes mentionnés ci-dessus.

Toutes ces approches permettent de mener une analyse des risques cohérente. Une proposition de réglementation sur les tassements est détaillée en Partie 3.

II. Campagne d'essais

A. Généralités

A défaut d'avoir pu identifier des sinistres clairement attribués à des phases de fonçage, des essais ont été réalisés sur plusieurs chantiers afin de pouvoir éclaircir et cerner les causes probables de risques.

Du fait de l'interdiction imposée en dessous de 50m, très peu de chantiers de vibrofonçage ont lieu à proximité ou dans les enceintes SNCF. Les seuls cas existants sont soit autorisés dans le cas d'une démolition à proche échéance des installations existantes.

B. Méthodologie d'évaluation des nuisances

Dans le cadre de mon projet, il m'est demandé dans une même logique d'appréhension des nuisances, de proposer une méthodologie de mesure standard sur site. En voici une esquisse.

1. *Mesure des vibrations*

a) Descriptif du matériel employé

Afin de mesurer les vibrations, des géophones et une unité d'acquisition sont nécessaires. Peut s'ajouter à cet ensemble un GPS afin de positionner précisément le système de mesure sur des chantiers de grandes étendues tels que des mines par exemple.

Un géophone a pour but d'enregistrer les déplacements du sol. A cette fin, il est composé d'aimants électromagnétiques qui enregistrent les mouvements du sol par rapport à un niveau. La retranscription des mouvements peut se faire dans les trois directions.

Les trois broches à la base permettent d'ancrer le géophone dans le sol afin de transmettre le plus fidèlement possible les mouvements du sol. Il est précisé aux futurs utilisateurs qu'ils pourront rencontrer des difficultés en essayant d'implanter les géophones dans des terrains granuleux.

b) Précautions de mise en œuvre

Une attention particulière devra être portée au gain d'acquisition des mesures. En effet, un gain trop faible ne permettrait pas d'affiner les mesures et à l'inverse un gain trop fort entraînerait une saturation du signal enregistré. Ainsi, pour des mesures de coup de marteau, un gain idéal est de 16, pour une circulation urbaine le gain adéquat se situe entre 1024 et 2048.

c) Analyse et interprétation des mesures

Afin d'étudier des phénomènes tels que le vibrofonçage dont les fréquences de fonctionnement sont typiquement entre 10 et 40Hz, il est nécessaire d'acquérir un grand nombre de points de mesures.

Pour distinguer les 3 sorties du géophones correspondant aux trois directions de mesure, une astuce simple est à retenir. La voie du géophone ayant la plus forte amplitude correspond à la direction horizontale la plus proche de la direction de la source (de l'onde). Afin de différencier les deux voies restantes, on peut utiliser le critère suivant : plus on s'éloigne de la source, plus l'amplitude diminue sans pour autant que la fréquence soit modifiée. De ce fait, la composante verticale sera la plus faible des deux composantes.

Le signal obtenu après transfert sur outil informatique est une banque de données (Excel) regroupant des mesures de position rangées par voies et prises par intervalle de temps décidé au préalable par l'utilisateur. Pour en déduire une comparaison vis à vis des vitesses particulières limites, il est nécessaire de déduire de ces données de position les vitesses mesurées. Pour cela, il faut déterminer l'amplitude du signal puis la diviser par le nombre de pas temporels séparant deux pics de valeurs.

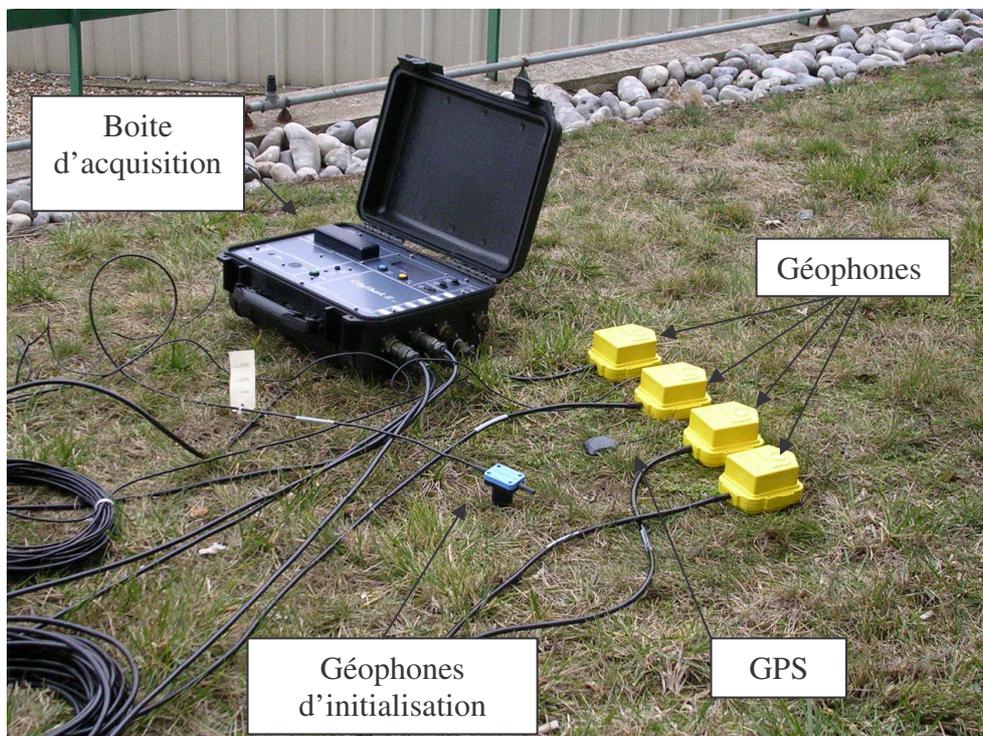


Figure 15 : Outils de mesure des Vibrations



Figure 16 : Vue type d'un Géophone



Figure 17 : Sens de mesure d'un géophone

Les vibrations sont mesurés à l'aide d'une unité d'acquisition de mesures de type CityShark, de géophones de marque GeoSpace de 4Hz au nombre de 4 séparés de 5, 10, 15 et 20m du système vibratoire pour évaluer l'atténuation des vitesses particulières.

Les tassements sont mesurés aux mêmes distances et à proximité immédiate des fondations d'un ouvrage s'il y a en un à proximité et sur la voie s'il y en a une à proximité.

A partir des mesures d'enfoncement, on peut d'emblée tracer l'évolution de la profondeur de fonçage en fonction du temps. Le but étant par la suite de retrouver à partir de Braxuus les coefficients en élastoplastique ou en viscoplastique correspondants à la courbe de fonçage obtenue sur site.

Afin de faciliter le traitement des données en aval des visites, j'ai développé une macro sous Excel, présentée en annexe.

Une fois transformé, on obtient un fichier ayant en en-tête les caractéristiques des réglages de l'unité d'acquisition (gain, fréquence d'échantillonnage, date, emplacement GPS) et des colonnes dans lesquelles sont consignées les données provenant des géophones.

A chaque colonne correspond un sens de mesure pour un géophone donné. Sachant que nous disposons de 4 géophones tri-directionnels de mesure et 1 géophone uni-directionnel de référence, cela fait au total 13 entrées à considérer. Une fois les colonnes et les sorties de géophones reliées, ensuite, on identifie le début du signal correspondant à une profondeur d'enfoncement donnée. Il reste à partager le fichier en tronçons d'une seconde à partir du départ fixé.

Dès lors, on prend pour chaque profondeur mesurée, l'échantillon d'une seconde correspondant que l'on enregistre dans un fichier à dénomination prédéfinie. Les courbes de variation des données en fonction du temps étant sinusoïdales, on extrait pour chaque échantillon le maximum et le minimum des données en valeur absolue que l'on moyenne pour être le plus juste, colonne par colonne. Ensuite, pour chaque fichier, on transforme les données en vitesses particulières par la formule suivante :

$v = \frac{X}{G * C * S}$ avec	X	Amplitude sur un échantillon d'une seconde des données enregistrées	bits
	v	Vitesse particulière	m/s
	G	Gain	Sans unité
	C	facteur de conversion	bits/volt
	S	Sensibilité du capteur, données constructeur en fonction de l'amortissement	Volt/m/s

Pour exploiter les mesures, il faut distinguer les études suivant chaque composante de vitesse selon les prescriptions de la circulaire du 23 juillet 1986.

On représente les courbes d'évolution des vitesses particulières en fonction de la distance pour en déterminer une loi d'atténuation.

On peut également tracer l'évolution des vitesses particulières avec la profondeur d'enfoncement.

2. *Mesure des tassements*

Pour étudier les tassements engendrés, un simple suivi topographique est conseillé. Il doit être effectué avant et après les travaux pendant une durée pouvant aller jusqu'à deux semaines pour évaluer l'influence des pressions interstitielles.

Pour les chantiers visités, nous avons mesuré les tassements à 5,10, 15 et 20m de la source vibratoire.

Une caméra à haute-vitesse peut également être utilisée afin de visualiser la propagation des ondes en surface (apparition d'ondes P) et leur atténuation.

3. *Mesures élargies aux autres nuisances*

Des mesures sonores ont été réalisées à 5 et 20m de la source afin de couvrir un panel plus larges des nuisances engendrées.

C. Chantiers auscultés

3 cas ont été étudiés respectivement à Vesoul, à Bordeaux sur le pont sur la Garonne et sur le site d'ICE à Verberri. Ces cas relèvent individuellement d'un intérêt particulier :

Vesoul car des profilés et des palplanches ont été foncées à proximité d'un ouvrage SNCF et d'une voie ferroviaire existante, le pont métallique sur la Garonne de Gustave Eiffel car présentant un risque de mise en résonance et le site d'ICE pour la possibilité d'étude des tassements et de transmission des vibrations avec l'utilisation d'engins de fonçage différents.

1. *Verberri : Fonçage de palplanches dans les locaux d'ICE-IHC*

a) Présentation du site

Contexte et intérêt des mesures

Dans le cadre du partenariat noué lors du projet national, ICE nous a ouvert ses portes courant du mois de mars 2006 pour une campagne d'essais. Le but premier de ces mesures était de tester le matériel de mesure, de roder l'exploitation des données.

Cette visite a été également l'occasion pour moi de profiter de l'expérience technique et de l'avis d'un fabricant de vibreur.



Figure 18 : Verberri / Vibrofonçeur ICE216



Figure 19 : Verberri / Appareillage de mesure

Engins Utilisés

Les essais ont eu lieu courant du mois de mars 2006 avec un vibrofonçeur ICE-216 d'une fréquence de 38Hz et d'une puissance de l'ordre de 425kW soit une énergie d'environ 11,2kJ.

Profilé foncé

Ce sont des palplanches qui ont été utilisées pour ce site étaient des PU20 à foncer sur 5m de profondeur.

Conditions de sol

Sur 30cm on a de la terre végétale, puis du limon sableux brun sur 30cm, puis du sable et des graviers.

Appareillage de mesure

Le dispositif décrit précédemment a été mis en place pour les mesures de vibration. Aucun dispositif de mesure de tassements n'a été mis en place, seul deux photos ont été prises avant et après les phases de fonçage à un emplacement strictement identique. Deux sonomètres sans dispositifs d'acquisition automatiques ont été utilisés conformément à la norme qui impose de maintenir les dispositifs de mesure à hauteur des yeux et des oreilles. Une caméra a également été utilisée pour rendre compte de l'essai et faciliter la prise de mesure de l'enfoncement

b) Apport à l'étude

Concernant les vibrations

Les courbes obtenues à la suite de ces essais sont présentées dans les pages suivantes.

Les enseignements directement tirés de ces essais sont les suivants :

- Tout d'abord, la courbe d'enfoncement est conforme à la littérature (figure n°6). Il serait intéressant de comparer cette courbe d'enfoncement avec celle que renvoie le logiciel de prévision Braxuus élaboré dans le cadre du projet national Vibrofonçage.
- On peut également remarquer sur la figure n°7 que plus la palplanche rentre dans le sol, plus les vitesses particulières mesurées sont importantes à distance fixe de la source.
- Plus on est proche de la source, plus les vitesses particulières sont importantes.
- A partir de la figure n°8, on peut remarquer que la méthode de prévision préconisée par l'Eurocode 3 semble adéquate du fait qu'elle est conservatrice tout en étant réaliste. De plus, qu'elle que soit la profondeur de fonçage, elle englobe toujours les courbes de vitesse.

Cette méthode de quantification des vibrations a plusieurs avantages : Elle permet en phase d'avant projet d'avoir une approche des risques pouvant être engendrés par les vibrations sur des structures tels que des guérites de signalisation, relais de télécommunication ou tout autre équipement informatique ou électronique. Elle permet donc de déterminer le matériel le plus adéquat à l'environnement du projet.

Concernant les tassements

A partir des photos prises avant et après les phases de fonçage a un emplacement fixe, force est de constater qu'aucun tassement notable de l'environnement proche n'a été signalé.

Cela s'explique car le site où ont été mise en place les palplanches d'essai possédait déjà en son sein nombre de palplanches qui avaient été foncées par le passé. De ce fait, le sol avait déjà été préalablement densifié.

Concernant les nuisances sonores

L'ordre de grandeur du niveau sonore mesuré est de 85 dBA. Il est difficile cependant d'exploiter l'atténuation des niveaux sonores avec la distance, l'ordre de grandeur à 5m semble suffisant pour l'étude.

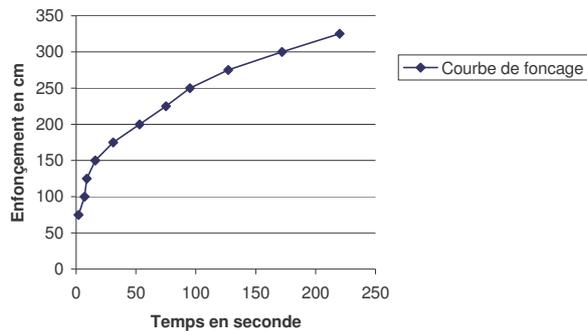


Figure 20 Verberi / Evolution du fonçage dans le temps

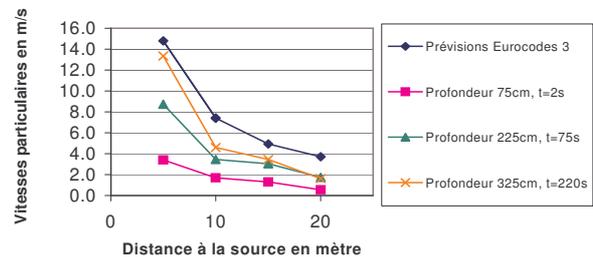


Figure 22 : Verberi / Evaluation de l'atténuation des vitesses particulières avec la distance

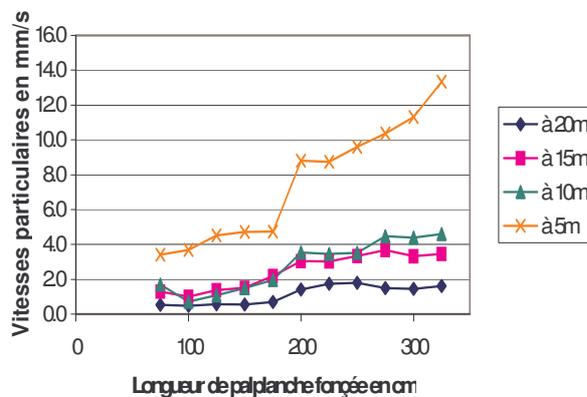


Figure 21 Influence de la profondeur de fonçage sur l'amplitude des vitesses particulières

2. Vesoul : suppression d'un passage à niveau

a) Présentation du site

Contexte et intérêt des mesures

Le chantier de Vesoul (suppression d'un passage à niveau) présente de nombreux avantages pour ce projet de recherche.

En effet, il permet d'avoir un exemple de chantier dans lequel on vibrofonçe à proximité presque immédiate de l'ouvrage (de 5m à ~10m) dans des conditions de fonçage tout à fait justifiables :

- la voie est fondée sur une hauteur du ballast d'environ 1m puis sur des terrains granuleux et sur des sables argilo-bitumineux. Qui plus est, le chantier se trouve à moins de 30m d'une gare avec un rallant de 40km/h afin de limiter la vitesse de certains trains de fret qui ne s'arrêtent pas en gare de Vesoul
- enfin, l'ouvrage à proximité supportant la voie sera démoli dans les semaines qui suivent les phases de blindage.

Profilé foncé

Des pieux HEB 300 ont été mise en œuvre soit avec un vibreur PTC 20H soit avec un trépideur MenckSB120 et des palplanches PU16 et PU20 ont été foncées à l'aide d'un vibreur ICE 416.

Conditions de sol

Sous les voies, on a du ballast sur 1m de hauteur, du remblai sur 20/25cm puis des limons sableux et du sable grossier puis de l'argile verdâtre sur une dizaine de mètre puis des marnes argileuses.

Appareillage de mesure

Le dispositif décrit précédemment a été mis en place pour les mesures de vibration.

Un suivi des tassements sur la voie la plus proche des phases de fonçage a été convenu : un point 0 a été réalisé avant les essais et il a été convenu que l'opération serait répétée une fois les essais réalisés, puis le soir même, le lendemain matin et le lendemain soir. En fonction de l'évolution des relevés, la fréquence de suivi serait évaluée.

Deux sonomètres sans dispositifs d'acquisition automatiques ont été utilisés conformément à la norme qui impose de maintenir les dispositifs de mesure à hauteur des yeux et des oreilles.



Figure 23 : Vesoul / Trépideur Menck120 à proximité de la voie



Figure 24 : Vesoul / Vibreur PTC20H et voies ferroviaires



Figure 25 : vue d'ensemble du chantier

b) Apport à l'étude

Concernant les vibrations

Les essais ont montré que les vibrations transmises par le trépideur étaient pratiquement 5 fois inférieures à celles émises par le vibrofonçeur, soit des vitesses particulières de l'ordre du dixième de mm/s. Il a été décidé d'utiliser le trépideur dans un rayon de 5m à proximité de l'ouvrage afin de s'assurer de respecter les niveaux de vibration même en fonçant le rideau à quelques mètres des fondations de l'ouvrage (structure jugée en état résistant).

A partir des résultats des essais préalables, la loi d'évolution de l'Eurocode3 se vérifie. Les données recueillies sur site avec l'apport du LCPC sont en cours de traitement.

Concernant les tassements

En effet, sur ce chantier, nous avons été amenés à suivre l'évolution des tassements des voies en suivant l'avancement des différentes phases de chantier. Ce qui est intéressant sur ce site c'est que le rideau de palplanches à foncer était mis en place en direction de la voie et donc suivant l'avancement de mise en place du rideau, nous avons pu suivre l'évolution des tassements résultants. Les résultats des relevés ne montrent pas l'apparition de tassements, à court et long termes. Cela est sûrement dû à la présence d'une couche argileuse sous le ballast et le remblai.

Concernant les nuisances sonores

Il est à remarquer que le trépideur produit bien plus de nuisances sonores que le vibrofonçage. L'ordre de grandeur des niveaux sonores est de 115dBA pour le trépideur et de 90 dBA pour le vibrofonçeur.

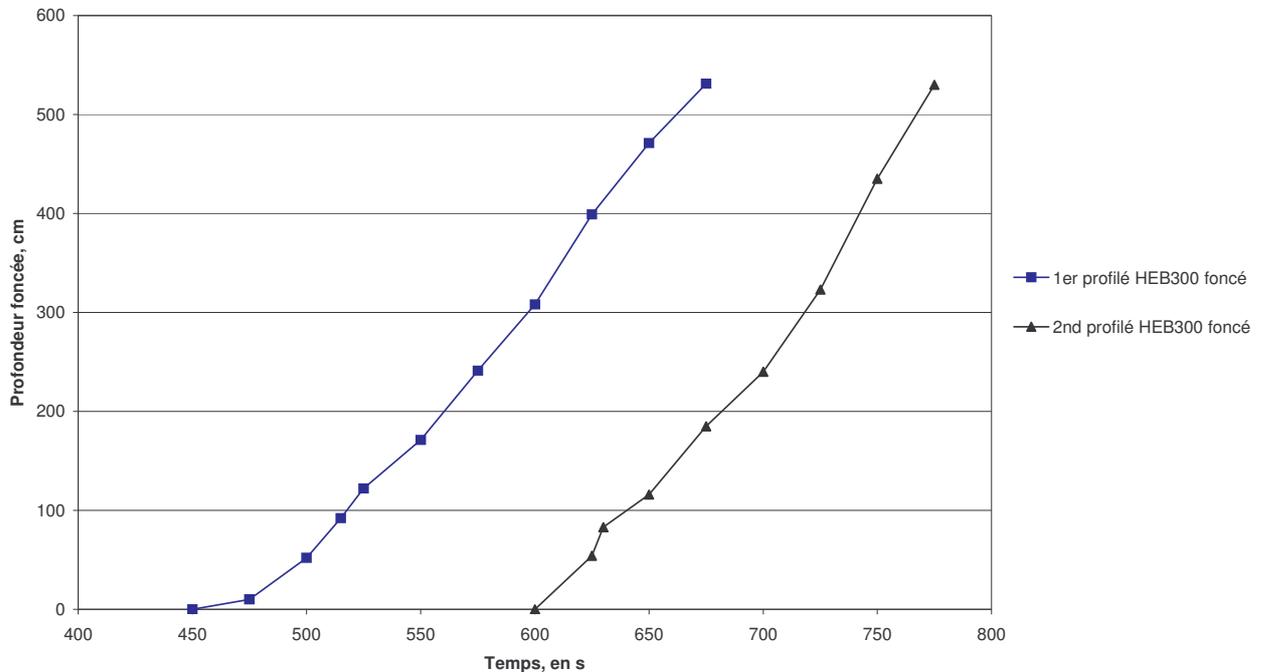
Qui plus est l'utilisation de guide de fonçage métallique engendre des nuisances plus importantes notamment dues au frottement fer-fer. Les Allemands utilisent eux dans guides en bois qui réduisent sensiblement les niveaux sonores, d'environ 10Dba.

Vitesse de Fonçage

La vitesse de fonçage a été mesurée avec un chronomètre et un marquage à la peinture tous les 25 cm sur le pieu.

Les courbes présentés sur la figure 1, ont été corrigées des temps d'attente

Figure 1 : Courbes de fonçage du trépideur Menck120



Mesures acoustiques

Pour avoir une idée générale du bruit sur le site, des mesures ont été réalisées au cours de la matinée toujours en un même point (voir figure 2). Les résultats sont les suivants :

Heure	Niveau sonore en dB(A)	Observations
7:15	50 - 60	Bruits de la ville
8:10	90	Groupe + trépideur lors de l'enfoncement de palplanches : 36m du point de mesure
8:25	70	Groupe seul : 36m du point de mesure
10:00	85	Groupe + trépideur lors de l'enfoncement du 1er pieu : 55m du point de mesure

Des mesures ont été collectées pendant le fonçage à des distances différentes de la fonce (5,10,15 et 20m) (voir tableau ci-dessous)

Elément	mode d'enfoncement	à 5 m	à 10 m	à 15 m	à 20 m
1	Vibreur PTC 20H		Max : 98		75
	Trépideur MENCK SB120	Min : 95 Max : 116 Moy : 106	Min : 90 Max : 112,6 Moy : 101		92
2	Trépideur MENCK SB120	Max 114	95	93	90

La figure 26 montre une atténuation du bruit d'environ 5 à 7 dB(A) par tranche de 5 m

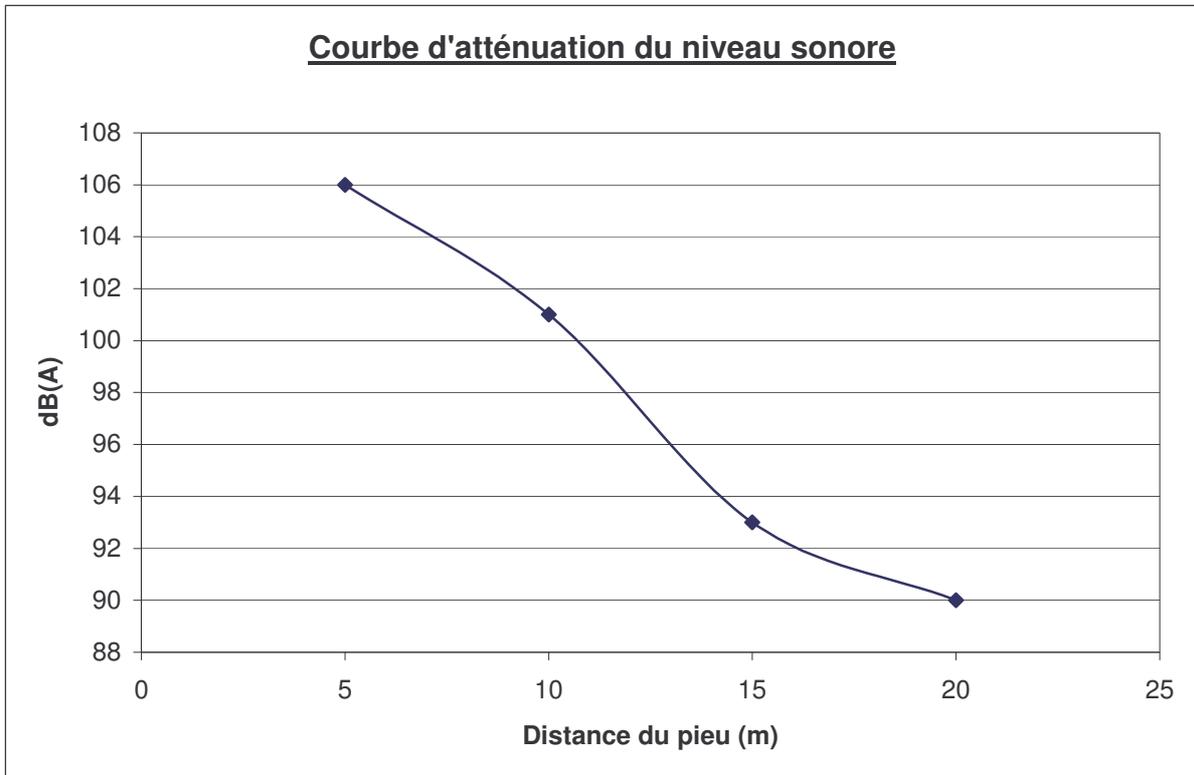


Figure 26 : Atténuation des décibels en fonction de la distance par rapport à la source

Vitesses Particulaires

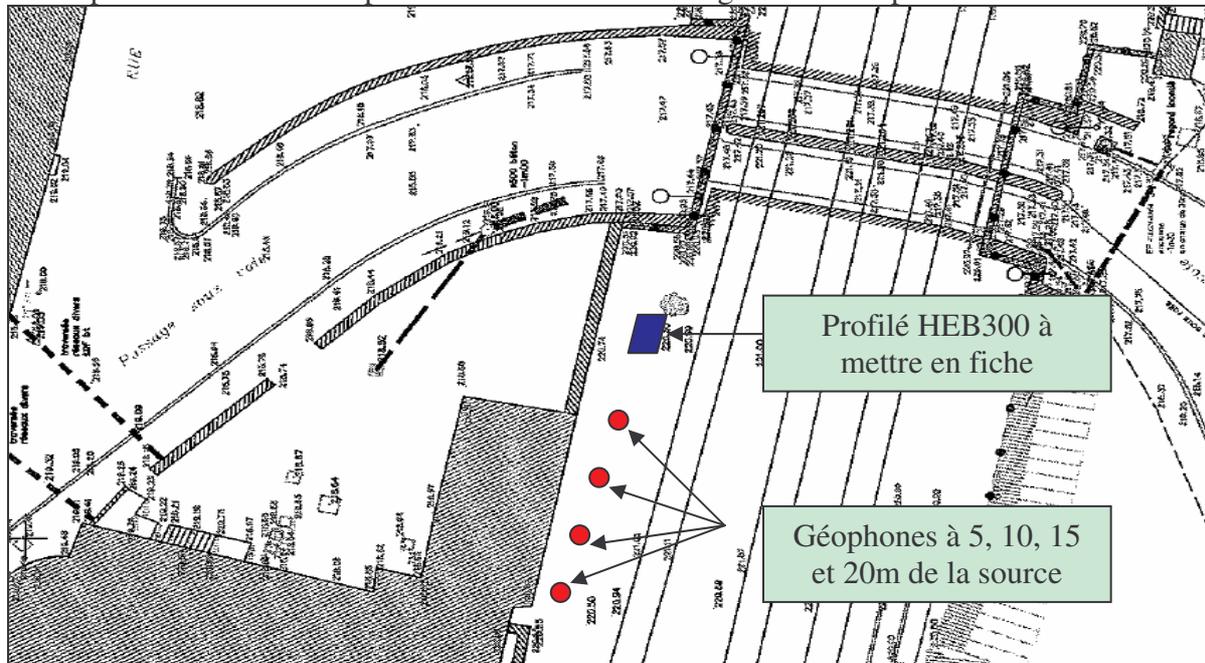
Remarques préalables :

Les mesures n'ont pas été effectuées dans les mêmes conditions que les « essais préalables ».

- En effet, le CETE de Lyon, intervenu le mardi 11 avril 2006, s'est intéressé aux vibrations transmises aux culées de l'ouvrage d'Art et au bâtiment à proximité directe des phases de fonçage. De notre part, nous nous sommes focalisés sur les vibrations transmises dans le sol. Toutes corrélations entre les deux phases de mesures doivent donc se faire avec prudence.
- Qui plus est, les profilés étudiés n'étaient pas les mêmes : lors des phases d'essais, ce sont des palplanches PU16 et PU18 qui ont été foncées tandis que lors de notre intervention, des HEB300*300 ont été mis en place.
- Enfin, le vibreur PTC20H utilisé a vite présenté des avaries lors de nos phases d'enregistrement. De ce fait, les données présentées ici ne représentent pas forcément le plein régime de fonctionnement.

Les mesures ont été effectuées à l'aide de 4 géophones 3D de marque Geo Space et de sensibilité 4 Hz. L'unité d'acquisition est du type Cityshark2.

Les capteurs ont été mis en place dans le remblai le long des voies à proximité du caniveau.



Plan d'implantation des géophones

Les évolutions de l'amplitude des vitesses particulières suivant la distance à la source vibratoire, pour le trépideur MENCK120 et le vibreur PTC20H, sont présentées respectivement en figures 27 et 28.

Pour indication, la courbe de prédiction des vitesses particulières suivant l'Eurocode 3 : « Calcul des structures en acier » (Partie 5, « Pieux et palplanches » Annexe C [Informative], «Mouvements du sol associés aux pieux et palplanches») est représentée suivant les caractéristiques propres aux deux engins mécaniques. Cette méthode est détaillée dans un fichier au format « Pdf » accompagnant ce rapport.

L'évolution des amplitudes des vitesses particulières suivant la profondeur de fonçage pour le trépideur MENCK SB120 est présentée en figure 29.

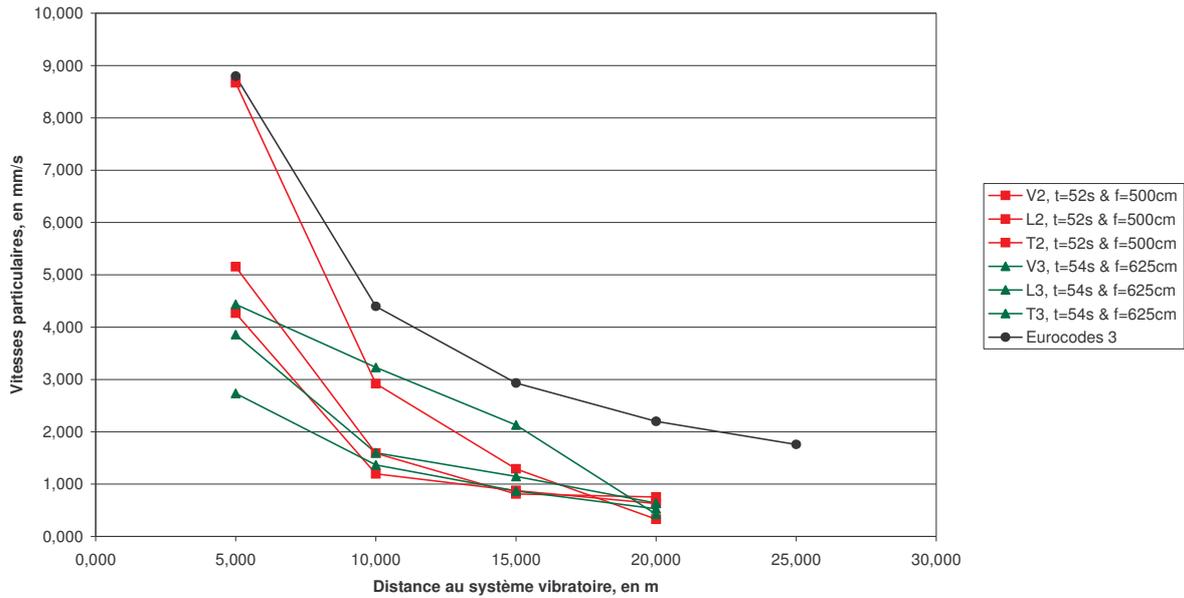


Figure 27 : évolution de l'amplitude des vitesses particulières avec la distance au système vibratoire pour les phases de trépidage, MENCK SB120

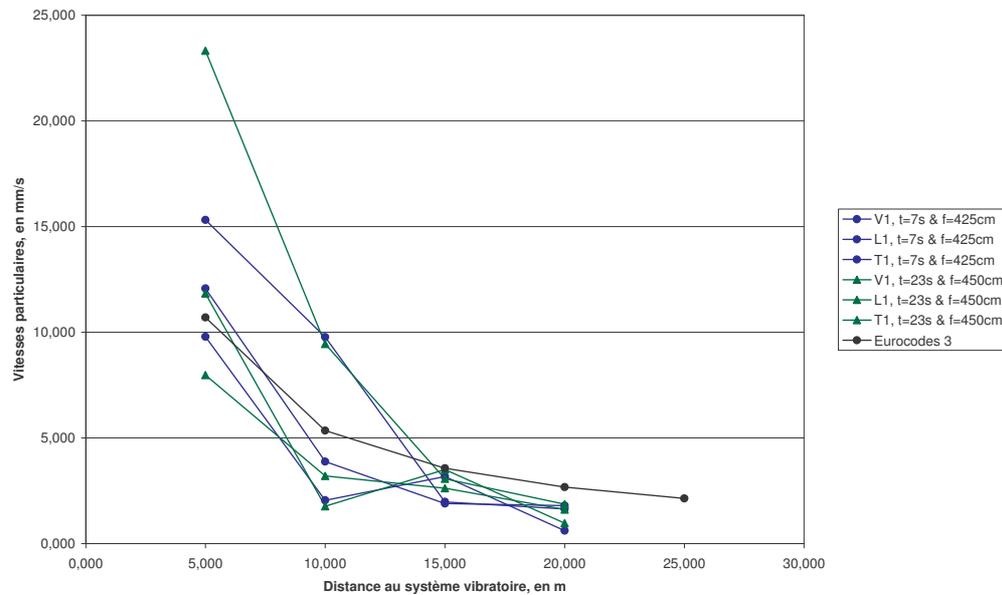


Figure 28 Evolution de l'amplitude des vitesses particulières avec la distance pour la phase de vibrofonçage, PTC20H

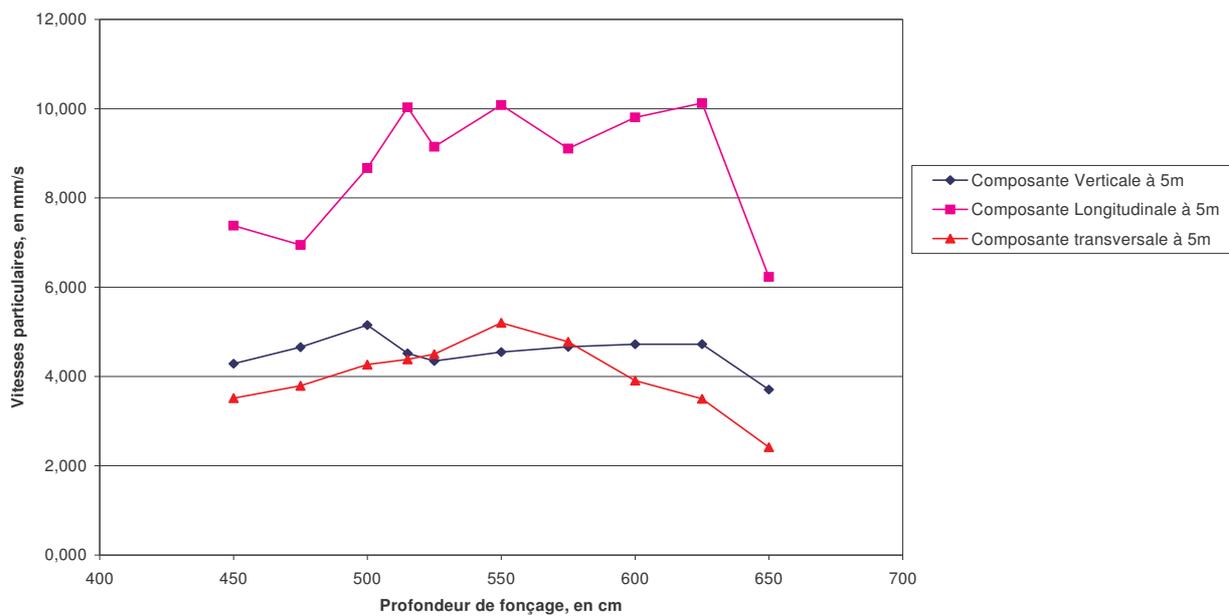


Figure 29 Comparaison de l'évolution de l'amplitude des vitesses particulières suivant la profondeur de fonçage selon les 3 directions de mesures, MENCK SB120

3. Bordeaux : suppression d'un bouchon ferroviaire

a) Présentation du site

Le cas du vibrofonçage de Bordeaux est intéressant dans le sens où des mesures en continues ont été effectuées. Ces mesures ont pour but de s'assurer que des problèmes de vibrations induites par les engins de chantier et les trains ne représentent pas de risques pour le pont, notamment le risque pour l'ouvrage de rentrer en résonance.

Avec Frédéric ROCHER-LACOSTE, nous ne sommes pas encore intervenu sur ce site. Cependant, j'ai eu l'occasion d'aller visiter ce chantier sur 1 journée courant mars et je suis entré en relation avec Vincent THOMAS, élève ingénieur en PFE à l'INSA de Toulouse, qui comme moi effectue son étude sur les vibrations, mais lui ne s'intéresse qu'à ce chantier.



Figure 30 : Engin de forage (Becket)

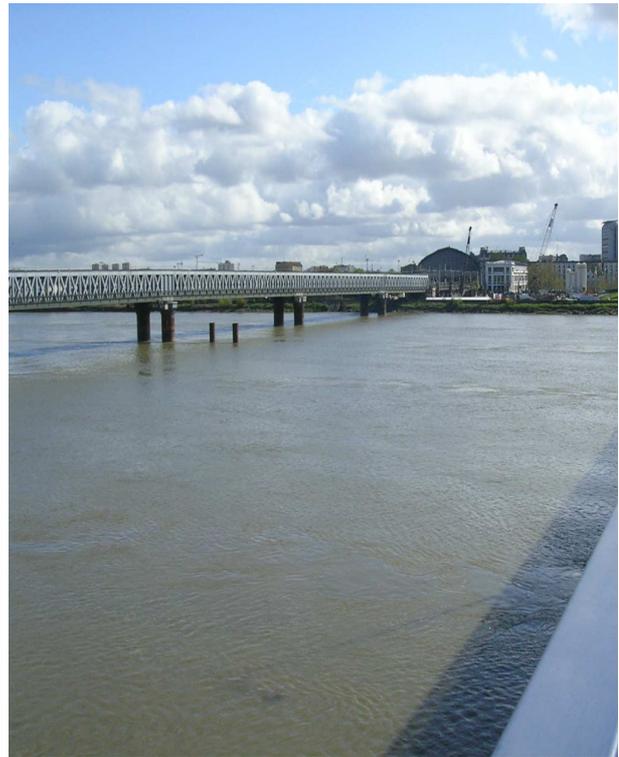


Figure 31 : Passerelle de Bordeaux

Phase de mise en œuvre des pieux

Des cylindres métalliques de diamètre de 1800mm sont d'abord vibrofonçés dans le sol puis on excave à l'intérieur du cylindre en ajoutant de la bentonite pour assurer la stabilité suite aux poussées des terres. On insère dans les tubes les cages d'armatures (26m = cages de 2*13m) puis on coule le béton par le biais de tuyaux métalliques fixés aux cages d'armatures. On coule plus de béton que réellement nécessaire (1m³ en plus) afin de pouvoir combler les vides laissés par le cylindre. On extrait les cylindres par vibrofonçage en fin de coulage.

Engins Utilisés

Le vibrofonceur utilisé est un PTC30H1.

Profilé foncé

Les profilés foncés sont des pieux de 23m de profondeur et de 1,80m de diamètre.

Conditions de sol

Le type de sol est typiquement des alluvions en partie supérieur et un substratum composé de marnes. La coupe type du terrain est la suivante : à partir du terrain naturel, on dispose d'un remblai sur les 4 premiers mètres, puis sur les 6m suivants des remblais sableux limoneux, sur les 7m suivant on a des argiles vasardes, puis sur les 3 m suivants des limons sableux puis des graves sur 4m et des marnes sur les 3 derniers mètres (profondeur finales 25m).

Appareillage de mesure

Des géophones (SM6, 4,5Hz) ont été placés au droit de chaque pile pour mesurer l'impact des vibrations induites par le chantier. Des avertisseurs ont été mis en place afin de prévenir l'équipe en cas de dépassement des seuils autorisés. Ces seuils sont en accord avec l'IN1226 en considérant l'ouvrage comme une structure . Le suivi des mesures a été effectué par Rincant BTP.

Aucun outil de mesure spécifique aux tassements et aux sons émis n'a été mise en place.

b) Apport à l'étude*Concernant les vibrations*

Des comparaisons ont été faites entre les vibrations induites par les trains et les engins de chantier. Un relevé avait été effectué dans le début des travaux par Vincent THOMAS, stagiaire de Eiffage TP. Il avait comparé les phases travaux et le passage des trains sur une journée avec leurs distinctions respectives (trains TGV/Passager/Fret) et la comparaison est assez saisissante : les vibrations induites par les trains sont largement supérieures à celles induites par les engins de chantiers, même si les fréquences des signaux sont différentes.

Qui plus est, on peut effectuer une distinction entre les types de trains : les trains de passagers sont les moins nocifs, une sous distinction pouvant être réalisés pour les TGVs qui sont moins nocifs que les trains de passagers normaux. Les trains de fret (marchandises) sont nettement les plus nocifs avec l'apparition des pics de vibration sur une journée type .

Cette comparaison est à approfondir et des conclusions seront tirées lors du rapport final.

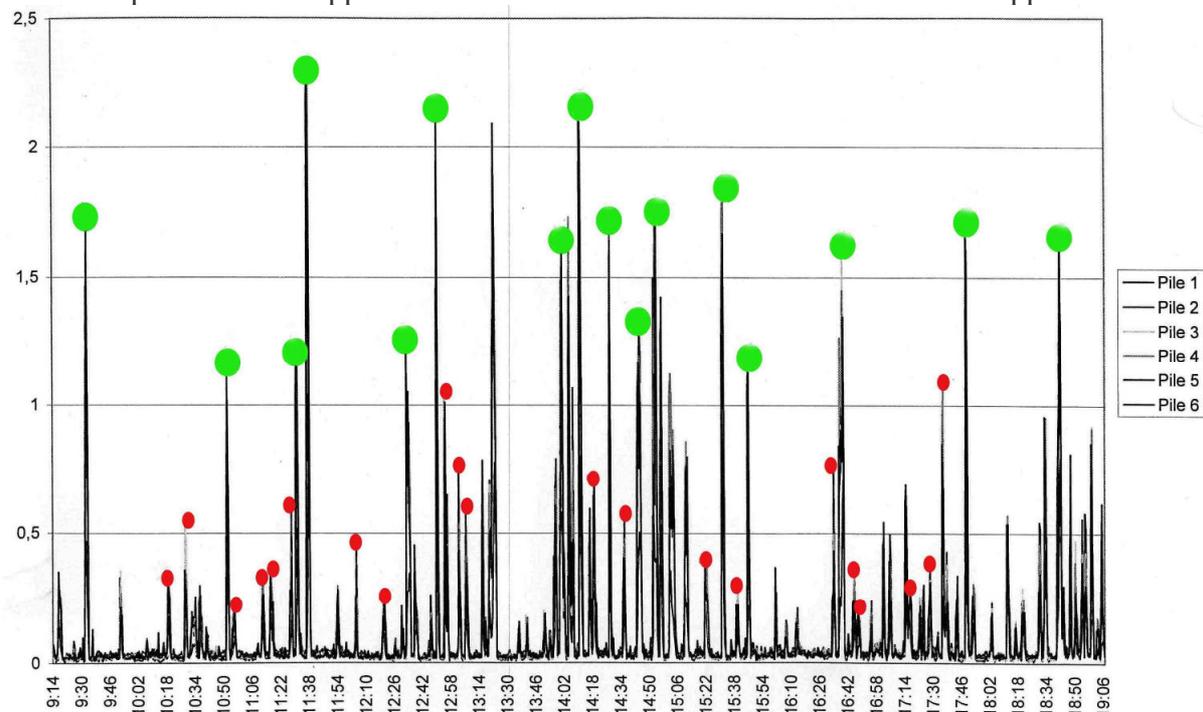


Figure 32 : Comparaison entre nuisances vibratoires induites par les engins de chantier et les trains

Les pics vert correspondent au passage de trains de fret, les rouges aux TGVs et les autres pics aux phases chantier

Pour le vibrofonçage, la plage de fréquences la plus sollicitée est la bande 10-30Hz et les vitesses particulières les plus importantes sont les vitesses transversales, la passerelle vibrant très peu dans le sens verticale.

A plus de 25m, on observe des vitesses particulières inférieures à 1,5mm/s

Plusieurs questions se posent à la suite de cette visite :

Tout d'abord, il y a une distinction à faire entre les vibrations transmises au sol et les vibrations transmises directement de l'ouvrage vers le sol : si l'on veut comparer l'influence des trains d'une part et des engins de fonçage d'autre part il faut arriver à dissocier la part de vibrations émises dans le sol qui est reprise par l'ouvrage : il est à remarquer qu'il peut très bien y avoir résonance comme atténuation au moment du passage des vibrations dans l'ouvrage.

Il est communément admis que les vitesses particulières mesurées dans le sol à la base des fondations sont égales à celles transmises à l'ouvrage et que les vibrations à la base de la pile sont égales celles que l'on retrouve en tête de pile. Cependant il se peut que suivant les conditions d'appui et les conditions de réalisation des piles et culées, on puisse rencontrer ce type de phénomène de résonance.

III. Proposition d'une réglementation

A. Approche des risques liés aux Vibrations

Au vu du comparatif des normes internationales sur les vibrations, il semble que la norme française soit plutôt sécuritaire. La future norme Européenne sera moins conservatrice tout en restant dans les ordres de grandeurs des seuils empiriques fixés

La norme Européenne tend également à se rapprocher de la norme française et allemande dans sa distinction faite des types de structures qui subissent les vibrations.

La méthode de prévision des niveaux de vitesses particulières semble suffisamment conservatrice si on considère les différentes comparaisons effectuées par rapport aux essais réalisés sur site et les rapports effectués lors d'essais préalables.

B. Approche des risques liés aux tassements

1. *Objet du document*

La lettre IGOA n° 1765 du 10 mars 2005 prévoit qu'en phase de projet une analyse de risque soit faite par le concepteur pour déterminer si le recours au vibrofonçage peut être autorisé, et éventuellement dans quelles conditions. Le présent document a pour objet de fournir des éléments qualitatifs d'appréciation du niveau de risques de tassement lié à l'utilisation du procédé du vibrofonçage à proximité des ouvrages d'art et des plateformes ferroviaires. Ce document comporte une proposition pour la suite à donner au projet de recherche en cours sur ce sujet.

2. *Préambule : portée du document*

- a) Ce texte, établi à la suite d'une étude bibliographique et de mesures sur différents sites, est destiné à apporter une aide à l'appréciation du niveau de risque de tassement ; il présente une « échelle de risque » mais ne fournit aucune indication quantitative sur la probabilité d'occurrence de ce risque. Une méthode d'évaluation de l'amplitude des tassements est présentée mais l'attention du lecteur est attirée sur le fait qu'elle n'est valable que dans les sables et qu'elle ne prend pas en compte les conditions d'eau dans les sols. Cette règle provient d'un chercheur nommé K. Rainer. Massarch (Pays Bas) qu'il a développé dans l'article suivant « Vibrations Caused by Pile Driving, Part 1 of 2 », Geo Engineering AB, SE-168, 41, Bromma, Stockholm, Sueden Deep Foundation, the magazine of the deep Foundation Institute, Summer 2004.

3. Considérations générales sur les principaux facteurs de risque vis-à-vis du tassement des terrains sous l'effet du vibrofonçage

Les terrains :

Ils peuvent présenter des sensibilités différentes vis à vis des risques de tassement.

1- Sols cohésifs

- argiles et certains limons : risque faible

2- Sols pulvérulents

(certains limons, sables, graves...) : les grains peuvent se réarranger lors du vibrofonçage, et engendrer des tassements. Le risque est accru lorsque le sol est saturé : en présence d'eau, les forces de cohésion peuvent disparaître, c'est le phénomène de liquéfaction.

Les caractéristiques des terrains :

Le risque de tassement (ou de liquéfaction) est principalement lié aux caractéristiques suivantes des terrains :

- indice de densité
- degré de saturation
- Hétérogénéité de la granulométrie
- forme des grains
- fréquence propre du terrain
- proximité d'éléments déjà foncés

Facteurs de risque liés aux ouvrages et à leur proximité:

- distance ouvrage / chantier de vibrofonçage
- sensibilité de l'ouvrage vis à vis de mouvements d'appui. Les ouvrages hyperstatiques, tabliers continus, portiques et les voûtes en maçonnerie (notamment les voûtes surbaissées) présentent une sensibilité relativement importante
- mode de fondation :
 - superficielle : le risque est présent. Une fondation superficielle ou semi-profonde peut-être impactée par une réorganisation des grains du sol se produisant à proximité (tassement avec ou sans basculement). Le risque est accru lorsque la fondation est assise en crête de talus. A noter qu'un massif semi-profond fondé sur le rocher, lui-même surmonté de grave, peut être considéré peu sensible au risque de tassement lié à l'utilisation du vibrofonçage
 - profonde : le risque est indirect. La réorganisation des grains du sol au dessus de la pointe d'un élément de fondation profonde peut entraîner l'apparition d'un frottement négatif, se traduisant par une augmentation des efforts dans les pieux puis éventuellement un tassement de l'appui

Ouvrages présentant des pathologies :

Dans ces situations (voûte fracturées, appuis déversés, maçonnerie disjointoyée, béton de chaux présentant une carence en liant, talus ou versant en limite de stabilité,...) la prudence doit être de mise, et il convient généralement de proscrire l'utilisation du vibrofonçage.

Facteurs de risque lié au matériel de vibrofonçage :

L'arrivée sur le marché, il y a quelques années, d'un nouveau type de vibreur - les vibreurs à hautes fréquences - a laissé penser que les nuisances potentielles du procédé seraient amoindries. Or il se trouve qu'une étude hollandaise a montré que dans certaines circonstances (certains sols,...) les vibreurs à hautes fréquences produisaient des tassements plus importants que ceux dus à des vibreurs à basses fréquences.

Par contre il semble que le principe de l'« excentricité variable » soit une réelle amélioration vis à vis des phénomènes que nous cherchons à éviter : l'« excentricité variable » tend en effet à limiter les vibrations entretenues lors des phases critiques de démarrages puis arrêt des vibreurs. Dans la mesure où les vibreurs à moment d'excentricité variable fonctionnent à de hautes fréquences, il convient donc de ne pas considérer ces matériels comme une parade suffisante vis à vis du risque de tassement des sols.

Incidence de la vitesse d'exploitation

Il va de soi que l'apparition d'un défaut de voie (gauche notamment) peut entraîner d'autant plus de conséquences que la vitesse des circulations est élevée. Il convient donc de tenir compte de ce facteur aggravant (la vitesse) dans l'appréciation du niveau de risque.

4. Appréciation du risque en fonction de la nature du sol et de la sensibilité de l'ouvrage

Type de sols* (dans lequel on vibrofonçe et dans lequel est fondé l'ouvrage**)		Sols fins			Sols pulvérulents			
Sensibilité du sol	Granularité (selon Norme P 94-012)	Argiles	Limons		Sables denses et graves (selon norme P 94-012)		Sables lâches (selon norme P 94-012)	
	Saturation (selon Norme P 94-012)	Saturé ou non	Non saturé	Saturé	Non saturé	Saturé	Non saturé	Saturé
	Evènement du tassement (occurrence)	Peu probable	Probable à peu probable	Probable	Probable	très probable	probable	très probable
	Aléa du tassement (amplitude)		Peu important	Peu important Peut être différé	Peu important	Peu important Peut être différé	important	Important Peut être différé
	Risque = Aléa x Evènement	ε	+	++	+	++	++	+++
Sensibilité de l'ouvrage	Voûte en maçonnerie	2	2	3	3	3	3	3
	Ouvrage à tablier hyperstatique, portique	1	2	3	2	3	3	3
	Ouvrage isostatique (hors voûtes) et cadre B.A.	1	1	2	2	3	2	3
Ouvrages en terre		1	2	3	1	2	2	3

ε : risque très faible

+ : risque faible

++ : risque élevé

Niveau 1 : peu préjudiciable

Niveau 2 : moyennement préjudiciable

Niveau 3 : très préjudiciable

* hors vases et tourbes dans lesquelles le vibrofonçage est proscrit. ** si l'ouvrage est fondé au rocher sain, le risque est très faible (ε).

Les reconnaissances géotechniques préalables doivent confirmer le type de sol en présence et ses caractéristiques. L'intervention d'un géotechnicien est indispensable pour cela. Ces reconnaissances doivent comporter au minimum les éléments suivants :

- Analyse granulométrique et sédimentométrique
- Détermination du Coefficient d'aplatissement des granulats
- Mesure de l'indice de densité I_D
- Détermination du Degré de saturation S_r
- Mesure du Niveau piézométrique
- Indice de plasticité

Nota concernant le tableau :

a) Les divers facteurs de risques (cf. page précédente) n'ont pas pu être tous intégrés dans ce tableau ; il convient donc, après évaluation du niveau de risque (+, ++ ou +++) de moduler le cas échéant ce dernier en considérant les facteurs non encore pris en compte (par exemple la préexistence de pathologies ou encore le positionnement en crête de talus d'une semelle de fondation...).

b) Plus que des certitudes, le tableau suivant indique les « tendances » au risque ; dans la réalité les sols rencontrés sont souvent à la frontière de 2 groupes, car constitués de plusieurs composantes de granulométries différentes (par exemple un limon sableux).

b) Le préjudice encouru par l'ouvrage à été déterminé de façon qualitative en fonction de l'amplitude du tassement ; ce dernier a lui même été défini qualitativement et non quantitativement.

5. *Recommandations suivant le niveau de préjudice encouru N1, N2 ou N3*

	Moins de 4m	4m-15m	15m-30m	Plus de 30m
Niveau 1 : peu préjudiciable				
Niveau 2 : moyennement préjudiciable				
Niveau 3 : très préjudiciable				

Légende



Vibrofonçage autorisé



Vibrofonçage interdit

Toute autorisation de vibrofonçage s'accompagne des mesures suivantes outre celles consistant à se conformer aux seuils vibratoires sur les structures et plateformes données par l'IN1226:

- Réalisation d'un essai préalable de vibrofonçage, à distance des installations sensibles, avec mesure des tassements à plusieurs distances du point de vibrofonçage.
- Contrôle de nivellement en pied de structure : appuis les plus proches de la zone de vibrofonçage, et cela avant, après le vibrofonçage et pendant les travaux.
- Contrôle de nivellement de la voie ferrée avant, après le vibrofonçage, et pendant les travaux
- Commencement des travaux par la zone de chantier la plus éloignée de l'ouvrage sensible (ou de la partie sensible de l'ouvrage)

Type de sols* (dans lequel on vibrofonce et dans lequel est fondé l'ouvrage**)		Sols fins			Sols pulvérulents			
Sensibilité du sol	Granularité (selon Norme P 94-012)	Argiles	Limons		Sables denses et graves (selon norme P 94-012)		Sables lâches (selon norme P 94-012)	
	Saturation (selon Norme P 94-012)	Saturé ou non	Non saturé	Saturé	Non saturé	Saturé	Non saturé	Saturé
	Evènement du tassement (occurrence)	Peu probable	Probable à peu probable	Probable	Probable	très probable	probable	très probable
	Aléa du tassement (amplitude)		Peu important	Peu important Peut être différé	Peu important	Peu important Peut être différé	important	Important Peut être différé
	Risque = Aléa x Evènement	ε	+	++	+	++	++	+++
Sensibilité de l'ouvrage	Voûte en maçonnerie	D > 15m	D > 15m	D > 30m	D > 30m	D > 30m	D > 30m	D > 30m
	Ouvrage à tablier hyperstatique, portique	D > 15m	D > 15m	D > 30m	D > 15m	D > 30m	D > 30m	D > 30m
	Ouvrage isostatique (hors voûtes) et cadre B.A.	D > 04m	D > 04m	D > 15m	D > 15m	D > 30m	D > 15m	D > 30m
Ouvrages en terre		D > 04m	D > 15m	D > 30m	D > 04m	D > 15m	D > 15m	D > 30m

Conclusion

Au moment de la rédaction de ce rapport, plusieurs interrogations demeurent et sont autant de pistes qu'il me conviendra d'aborder pour la suite de ce Projet de Recherche.

Tout d'abord, en ce qui concerne les tassements :

- la majeure partie des recherches entreprises sur le sujet concerne un type de sol particulier : les sables. C'est dans les sables que les risques de tassement sont les plus importants. Cependant, il reste nécessaire de justifier la généralisation de ces méthodes à tout type de sol, de granuleux à argileux.
- Le problème est également que peu de sinistres ont été répertoriés et lorsqu'ils le sont, ils sont très peu renseignés. Par conséquent, il est difficile dès lors d'identifier les sources de risques. Il est d'autant plus indispensable de multiplier les études de sinistres car ce sont les seuls critères qui pourront valider les méthodes de prévisions établies avec les essais sur site.

Concernant les vibrations, des essais sur site sont à réaliser afin de pouvoir vérifier la véracité et le conservatisme des coefficients d'atténuation présents dans la littérature.

Qui plus est, une attention particulière devra être portée aux phénomènes d'effondrabilité des loess et de liquéfaction généralisée des argiles pour bien écarter tout type de risques.

Cette toute première phase d'essais sur sites offre plusieurs débouchés.

Tout d'abord, elle augure d'une plus grande adaptabilité et une rapidité accrue d'exploitation des données récoltées sur les chantiers futurs à visiter. Enfin, elle conforte en partie les avancées effectuées en premier lieu.

Un guide visant à mettre en garde les différents acteurs SNCF ayant à traiter de ces techniques sera édité reprenant les conclusions majeures établies par le guide provisoire du vibrofonçage 2005 de l'IREX, par Aurore LEJEUNE m'ayant précédée et moi-même.

Bibliographie

Normes existantes sur le sujet

- Eurocode 3 : « Calcul des structures en acier », Annexe C, «Mouvements du sol associés aux pieux et palplanches», (1998)
AFNOR : Association Française de Normalisation, www.afnor.fr
- BS5228-4, «Code of Practice for Basic Information and Procedures for Noise and Vibration Control, Part 1», (1997); BS7385-2, «Evaluation and measurement for vibration in building, Part 2: Guide to damage levels from ground-borne vibration », (1993)
BSI : British Standards Institution, www.bsi-global.com
- PAN50 Annexe D, «Control of Blasting at Surface Mineral Workings», (2000)
PAN : Planning Advice Note, www.scotland.gov.uk/Publications
- «Circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement»,
INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, aida.ineris.fr
- UNE22-381, «Control de vibraciones producidas por voladuras», (1993)
AENOR : Asociación Española de Normalización y Certificación, www.aenor.es
- SS 460 48 66, «Vibrationer och stöt, Riktvärden för sprängningsinducerade vibrationer i byggnader», (1991)
SIS : Swedish Standards Institute, www.sis.se
- DIN4150-3, «Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche Anlagen», (1999)
DIN : Deutsches Institut für Normung, www.din.de
- NP2074, «Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares», (1983)
IPQ : Instituto Português da Qualidade, www.ipq.pt
- UNI9916, «Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici», (1991)
UNI : Ente Nazionale Italiano di Unificazione , www.uni.com
- SN640312, «Direttive per determinare l'effetto delle vibrazioni sulle costruzioni», (1978)
SNV : Schweizerische Normen-Vereinigung, www.snv.ch
- AS 2187.2, DR 04062, «Explosives - Storage, transport and use, Part 2: Use of explosives», (2004)
AS : Australian Standard, www.standards.org.au
- «Circular No.7 dated 29th August of 1997», (1997)
CMRI : Central Mining Research Institut, IS : Indian Standard, DGMS (Tech) (S&T), www.cmriindia.nic.in
- RI8507, «Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting», (1980)
USBM : US Bureau of Mines

- IN1226, «Consigne Générale sur l'emploi d'explosif et autres procédés spéciaux ainsi que l'utilisation d'engins mécaniques puissants», (1987)
Norme interne SNCF

Guides pour le mesurage des vibrations

- « **Guide de mesurage des vibrations transmises par le terrain lors de travaux géotechniques – partie 2 : vibrations induites par les engins mécaniques** »
Fascicule de documentation AFNOR FD P94-447-2 de juin 2003
AFNOR : Association Française de NORmalisation, www.afnor.fr
- « **Piling handbook** », **Chapter12: « Noise and vibration from piling operations »**
8th Edition, January 2005
Arcelor RPS (Rails, Piles & Special Sections), www.sheet-piling.arcelor.com
- « **Guide technique sur le vibrofonçage 2005** » [Version provisoire]
IREX, Projet National Vibrofonçage

Articles et publications*Sur les tassements :*

- « **An Energy-Based Excess Pore Pressure Generation Model for Cohesionless Soils** »
R.A.Green, J.K.Mitchell, C.P. Polito
Proceedings of the John Booker Memorial Symposium
Sydney, New South Wales, Australia, November 16-17,2000
A.A.Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands
- « **Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils** »
Green Russell A.
- « **Settlements and damage caused by construction-induced vibrations** »
K. Rainer Massarsch, Geo Engineering AB, Bromma, Sueden
International Workshop Wave 2000, Bochum, 2000
www.geo.se
- « **Effects of vibratory compaction** »
K. Rainer Massarsch, Geo Engineering AB, Bromma, Sueden
Proceedings at the Transvib Conference in Brussels 2003
www.geo.se
- « **Densification of sand caused by vibratory sheetpiling** »
P.Meijers, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands,2005
A.F. van Tol, GeoDelft, Delft, The Netherlands
- « **Compaction of granular soils by uniform vibration equivalent to vibrodriving of piles** »
R.A.P. Bement, A.R. Selby, 1997
- « **Vibration environmental effect of construction operations** »
M.R.Svinskin, VibraConsult, Cleveland, USA
www.vulcanhammer.net
- « **Basic of foudation design** », Chapter3 : « **Settlement calculation** »
Brengt H.Fellenius
www.fellenius.net
- « **Baugrundverbesserung** », Tiefenverdichtung
Hans-Gottfried Schmidt
Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland
- « **Instabilités de liquéfaction et phénomènes de mobilité cyclique dans le sables** »
J.Canou, N.Benahmed, J-C Dupla, V.De Gennero
CERMES, Revue française de Géotechnique n°98, 1^{er} trimestre 2002

Sur les vibrations :

- **« Enjeux et modélisation du vibrofonçage »**
Alain Holeyman, Conférence – Invitée
Professeur à l'université catholique de Louvain, Président du GBMS
Bâtiment Vinci, Place du Levant, 1 à 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique
Tél : 010/47.21.18 – Fax : 010/47.21.79 – e-mail : holeyman@gc.ucl.ac.be
Assemblée générale du Comité Français de Mécanique des Sols – 30 mai 2001 – Paris
- **« Real-time Measurement of the Impact of Pile Driving on Adjacent Property During Construction »**
Hesham Ali, Ph.D., P.E., Daniel Hart, P.E., Densa Nukunya, Ph.D., E.I.
Florida Department of Transportation
TRB 2003 : Transportation Research Board, Annual Meeting
- **« Etude des vibrations dans le sol pendant la mise en œuvre par vibrage de palplanches dans l'argile des Flandres »**
F.Rocher-Lacoste, A.Ben Romdhane & J.F.Semblat
- **« Pile Driving Vibration Energy-Attenuation Relationships in the Charleston, South Carolina Area »**
Edward L.Hajduk, P.E. ; Donovan L.Ledford, P.E. ; William B.Wright, P.E.
Proceedings : Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York, NY, April 13-17,2004
- **« Vibro-Driveability : A field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils »**
Kenneth Viking
Doctoral Thesis, May 2002, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- **« Vibrations Caused by Pile Driving, Part 1 of 2 »**
K. Rainer Massarsch, Geo Engineering AB, SE-168, 41, Bromma, Stockholm, Sueden
Deep Foundation, the magazine of the deep Foundation Institute, Summer 2004.
www.geo.se
- **« Vibrations Caused by Pile Driving, Part 2 of 2 »**
K. Rainer Massarsch, Geo Engineering AB, SE-168, 41, Bromma, Stockholm, Sueden
Deep Foundation, the magazine of the deep Foundation Institute, Fall 2004.
www.geo.se
- **« Battage de palplanches, Vibrations transmises au sol lors du fonçage, quelques conséquences pour le confortement de fondations d'ouvrages d'art en état précaire »**
Jean-François Corté, Ingénieur des Ponts et Chaussées, département des sols et des fondations, LCPC

- « **Analyse des vibrations liées à différentes sources d'énergie** »
Chapitre IV : Battage (Palplanches) et Chapitre V : Vibrofonçage (Pieux et Palplanches),
Dossier 32875, Travaux au rocher, rapport de recherches n°2.23.52.9, Groupe Géotechnique,
LCPC, Avril et Mars 2000
Jean-Pierre SARASAR, Technicien supérieur en chef au CETE de Lyon
- « **Sheetpile-induced vibrations at the lurie excavation project** »
John Glatt, Jill Roboski, S.M. ASCE and Richard J.Finno, M.ASCE
Northwestern University, Proceedings of Geo-Trans2004, Los Angeles, CA
Geo-Institute of ASCE (American Society of Civil Engineers)
- « **Predicting and calculation of construction vibration** »
M.R.Svinskin, VibraConsult, Cleveland, USA
24th Annual Member's Conference of the Deep Foundation Institute in DearBorn,
Michigan,USA (1999)
www.vulcanhammer.net
- « **Modeling of vibratory pile driving** »
F.Rausche, GRL Engineers, Inc., Cleveland, Ohio, USA
Proceedings of the International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil
Compaction: Louvain-La Neuve, Belgium. (Tranvib2002)
- « **Soils and Geology Procedures for Foundation Design of Buildings and Other Structures (Except Hydraulic Structures)** », **chapter 17 : «Design for equipment vibrations and seismic loadings** »
US Army Corps of Engineers, Publication Number: TM 5-818-1/AIR FORCE AFM 88-3,
CHAP 7, 1983