

## L' ESSAI DE CHARGEMENT DYNAMIQUE DE PIEUX

(Méthode dite  
par « *calage* »,  
ou « *PDA* »,  
ou « *CAPWAP* »)



# Objectif et historique

La méthode d'essai de chargement dynamique permet d'évaluer la capacité portante statique d'un pieu au moyen d'une sollicitation dynamique (impact).

Les capacité portante telle que mesurée au moyen d'un essai de chargement dynamique est en bonne cohérence avec les essais statiques. Les écarts observés, généralement inférieurs à 15%, relève principalement du temps de cicatrisation des sols et du choix de critère de rupture.

Ref : CORRELATION OF  
CAPWAP WITH STATIC  
LOAD TESTS  
Garland Likins and  
Frank Rausche, Stress  
Wave Conf 2004

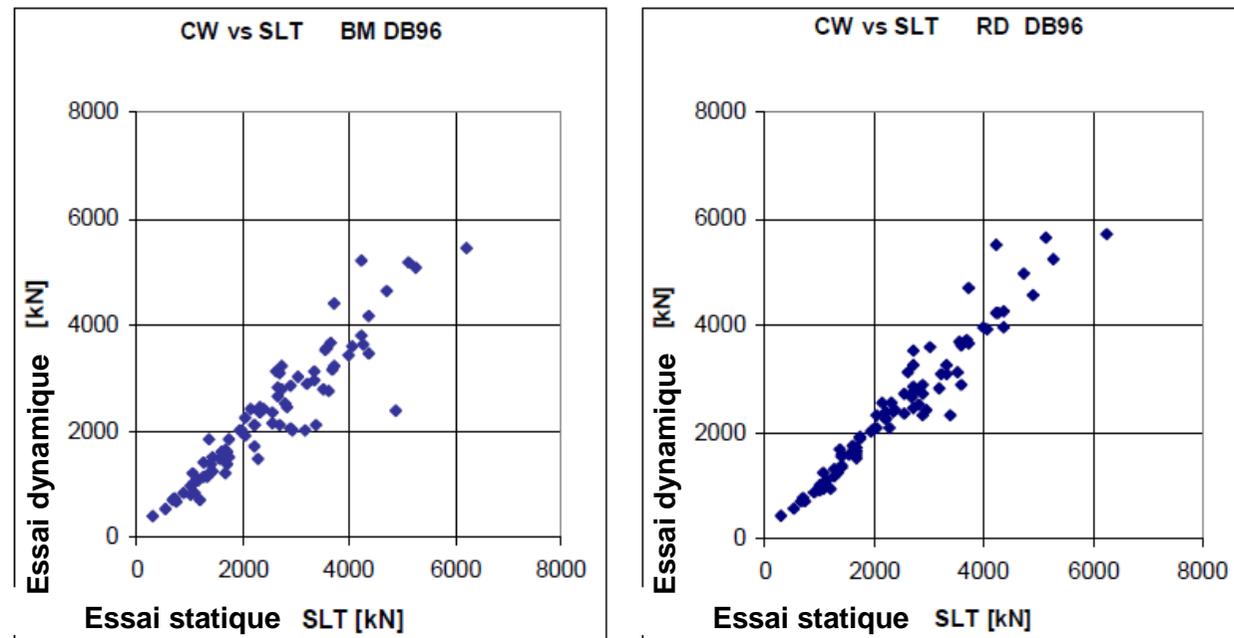


Figure 2: correlation of the 1996 database (left: Best Match, right: Radiation Damping)

# Objectif et historique

La méthode d'essai de chargement dynamique permet de tester un grand nombre de pieux en un temps et pour un coût extraordinairement réduits, ce qui induit une fiabilité des fondations très améliorée par rapport aux essais statiques seuls.

L'essai de chargement dynamique de pieux se développe dans les années 60 en Amérique du Nord. Son usage se répand dans les pays nordiques, au Japon et en Amérique Latine. Son caractère très économique séduit également les pays émergents qui l'adoptent massivement, au prix parfois de la rigueur de l'exécution et de l'analyse, et donc de la fiabilité et de la précision des résultats.

L'industrie pétrolière en général, et offshore en particulier, très familière des problématiques de battage de pieux, adopte rapidement la méthode pour la fiabilité qui peut être obtenue en testant un grand nombre de pieux.

# Objectif et historique

Aujourd'hui, la plupart des codes de construction internationaux encouragent l'usage des essais de chargement dynamique. Plusieurs milliers sont exécutés dans le monde chaque année, dont moins d'une dizaine en France.

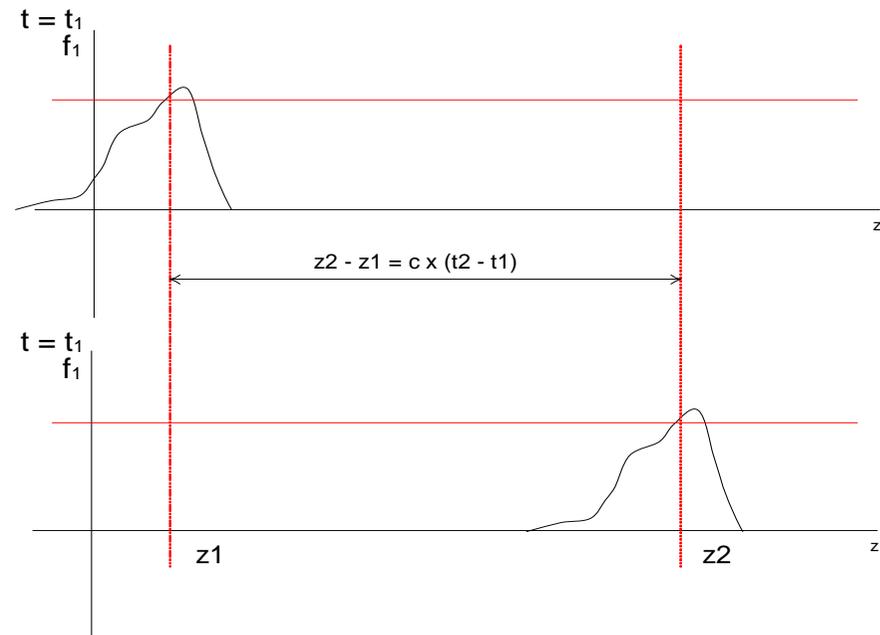
L'Eurocode 7 autorise une réduction sensible des coefficients de sécurité de dimensionnement des fondations, si celles-ci sont contrôlées au moyen d'essais de chargement dynamique, conjointement à un essai statique pour chaque type de sol et de pieu.

## Principe théorique

On se place dans l'hypothèse où le pieu est un milieu élastique continu de dimension 1.

On démontre que les champs des déplacements, vitesses particulières, accélérations, contraintes, sont des ondes.

$$\frac{E}{\rho} \times \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial t^2} = Rf$$

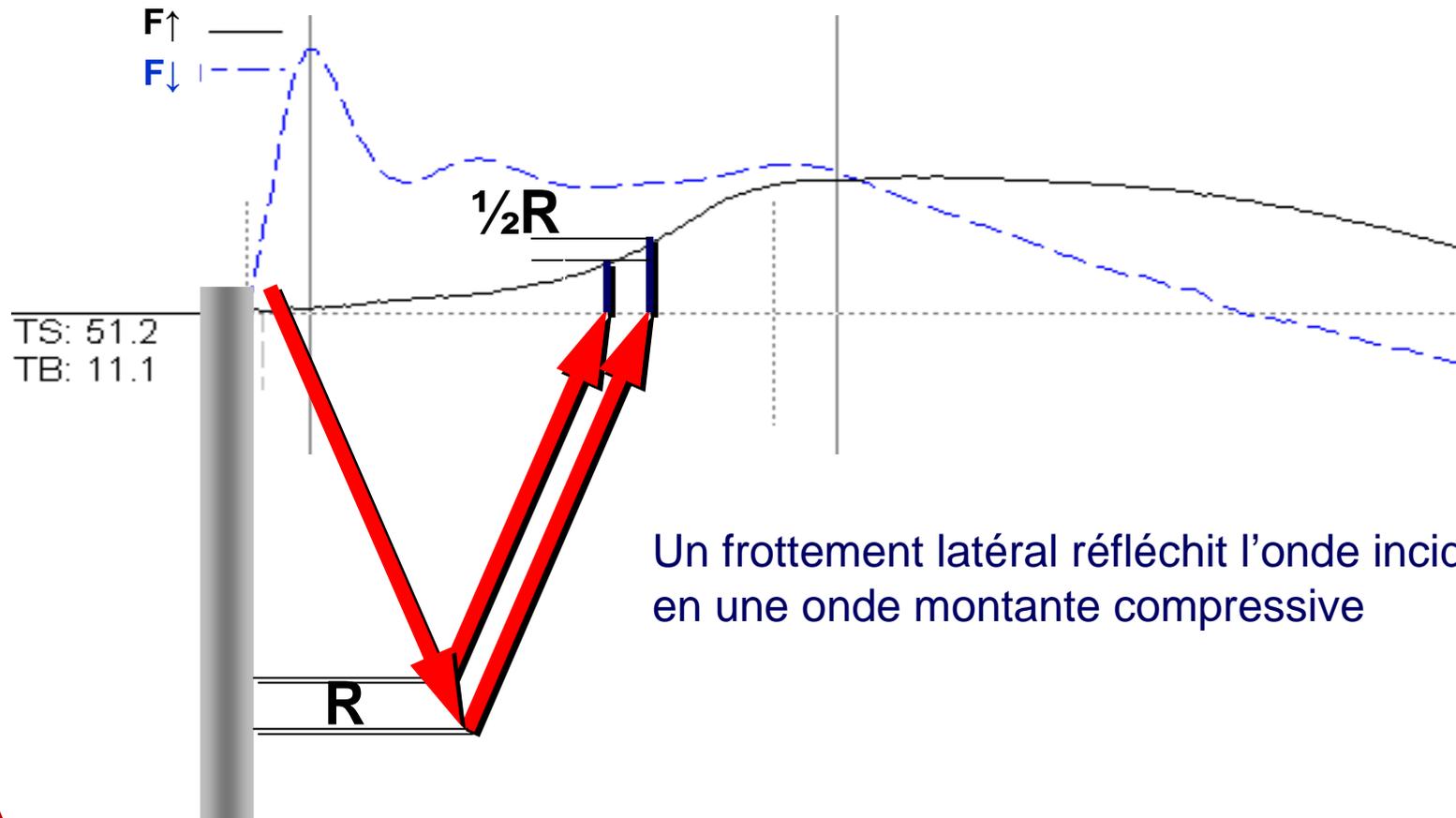


Dès lors, on sait décomposer l'onde en onde montante et onde descendante en tout endroit du pieu:

- Onde montante  $F\uparrow = \frac{1}{2} (F-ZV)$
- Onde descendante  $F\downarrow = \frac{1}{2} (F+ZV)$

Avec  $Z = EA/c$  impédance mécanique du pieu  
F (kN) et V (m/s) Force et vitesse mesurées  
A (m<sup>2</sup>) et c (m/s) section et vitesse de l'onde

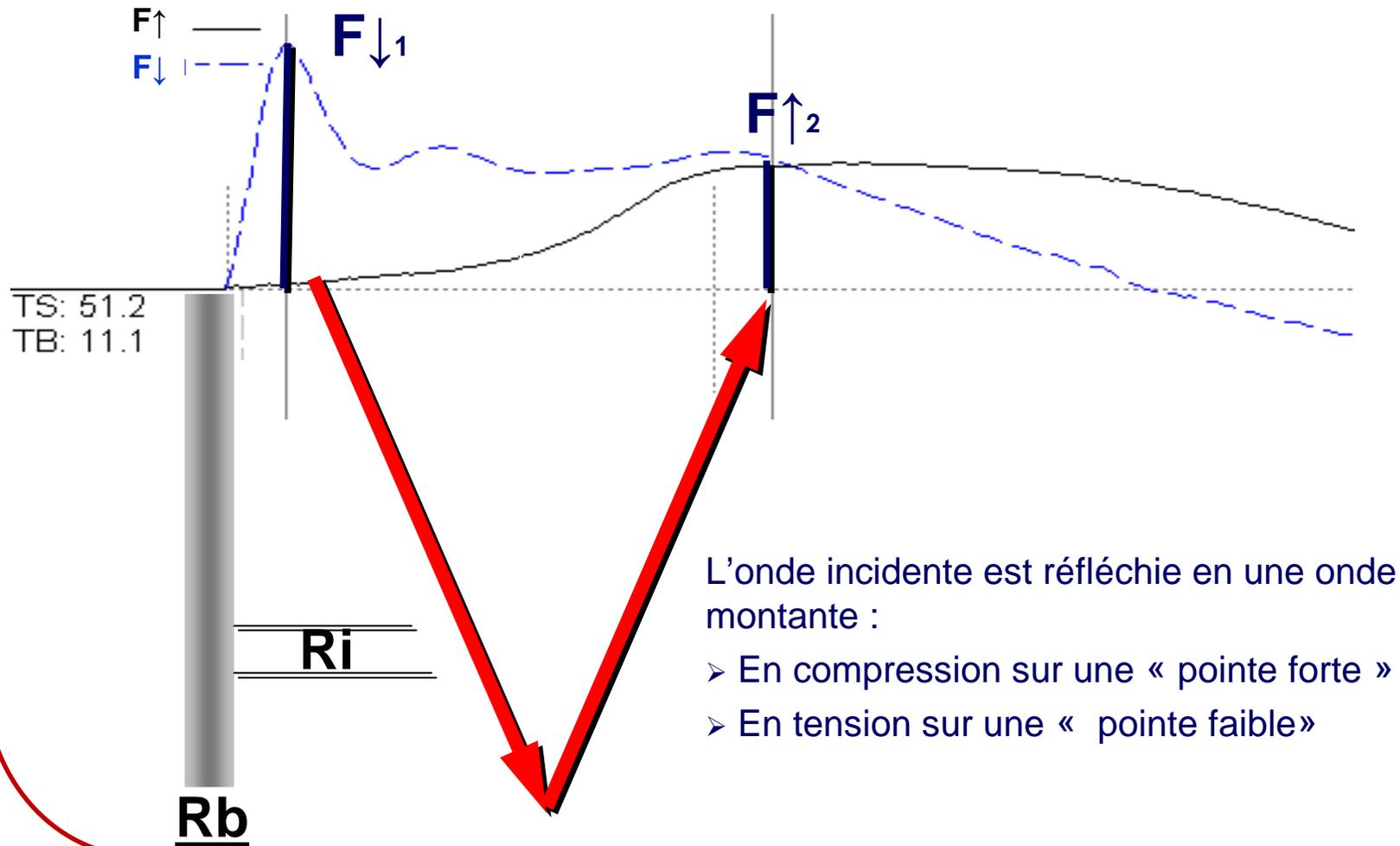
## Réflexion de l'onde sur un frottement latéral



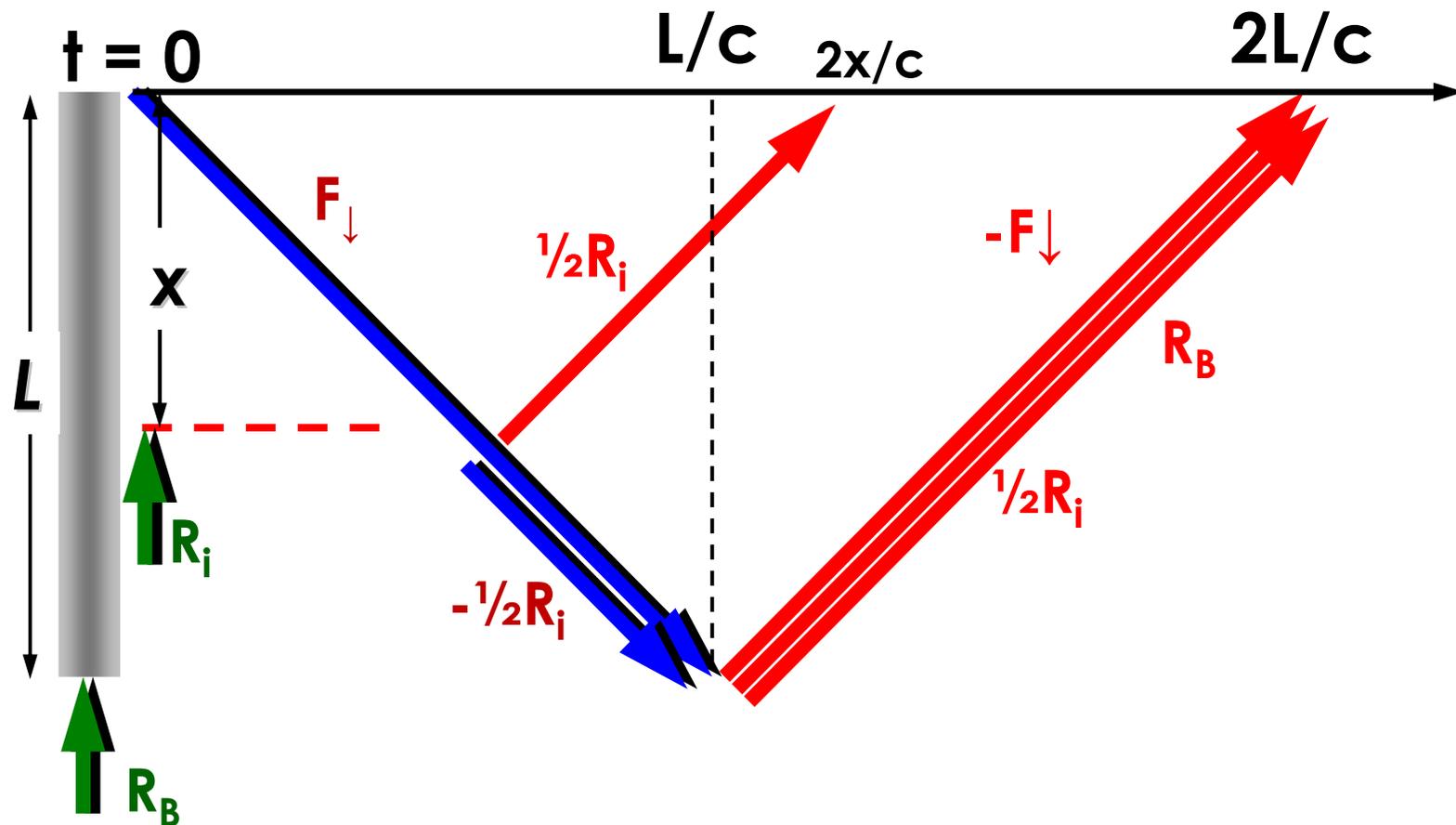
Un frottement latéral réfléchit l'onde incidente en une onde montante compressive

(Source: PDI)

# Réflexion de l'onde en pointe



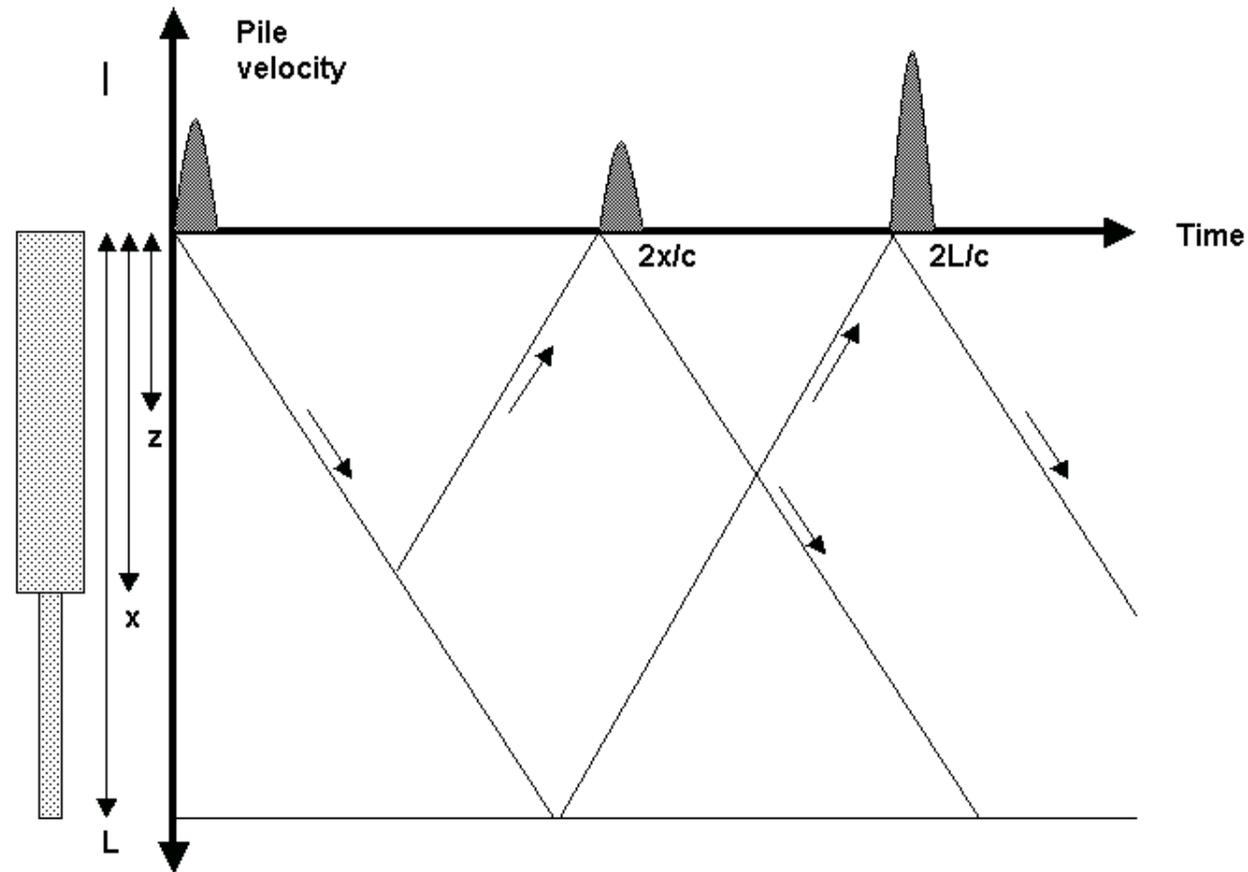
## Schéma de réflexion de l'onde incidente



(Source: PDI)

# Réflexion de l'onde à une discontinuité du pieu

(principe de la méthode de contrôle d'intégrité par impédance)

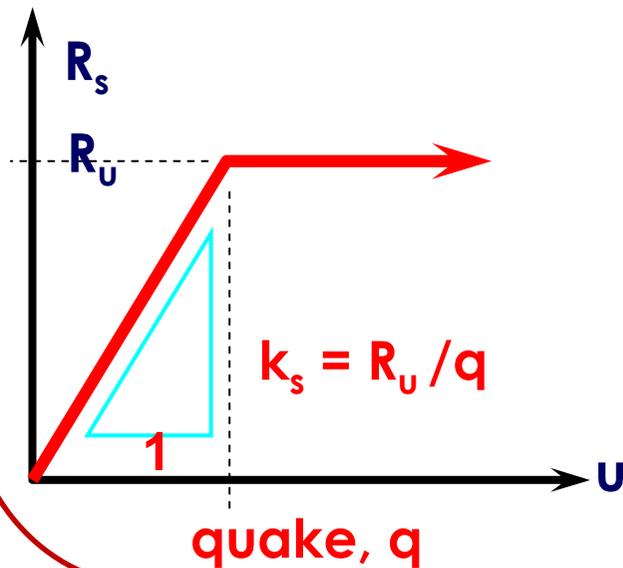


(Source: PDI)

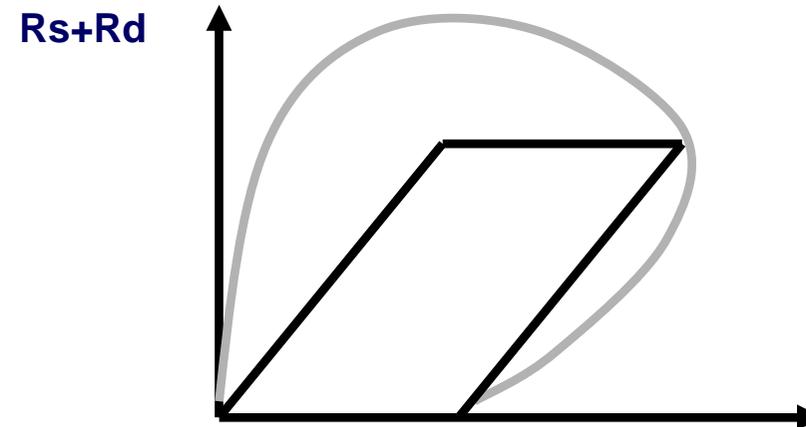
# MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DU SOL LA DYNAMIQUE DU SOL EN COURS DE BATTAGE

La résistance totale (en frottement ou en pointe) se décompose en une composante statique et une composante visqueuse.

La composante statique est du type élasto-plastique



La composante dynamique est du type visqueux, c'ad proportionnelle à la vitesse



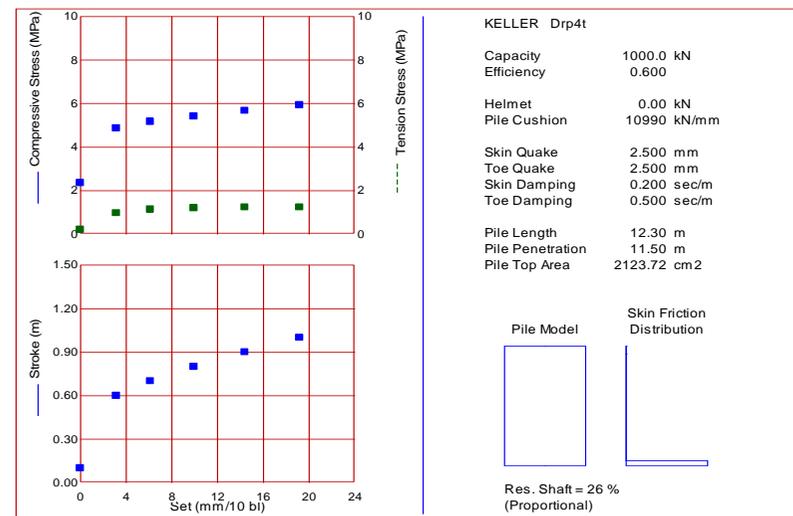
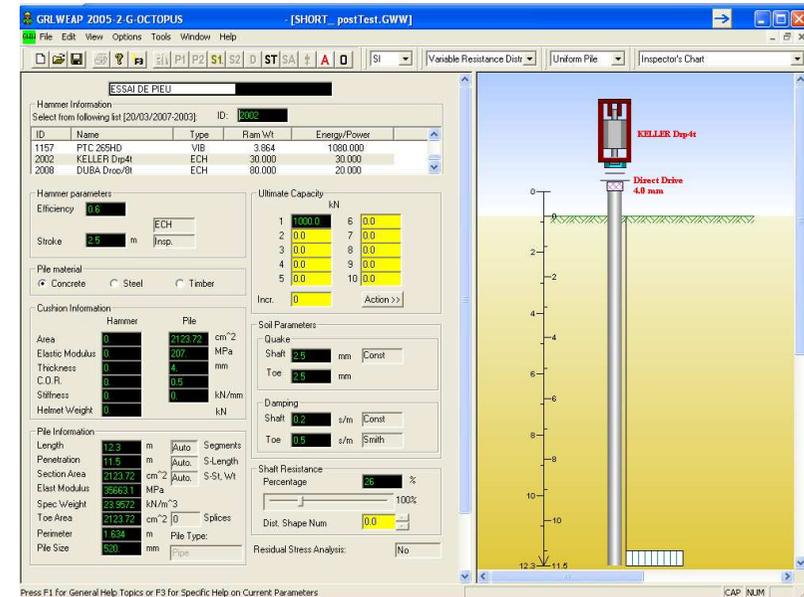
# MISE EN ŒUVRE : L'ANALYSE PRÉLIMINAIRE

Il est fortement recommandé d'effectuer une analyse préliminaire à l'essai.

Cette analyse se fait par résolution numérique de l'équation d'onde dans le système mouton/pieu/sol (logiciel GRL WEAP), sur la base d'hypothèses raisonnables de comportement de sol.

## L'objectif:

- Vérification des contraintes dans le pieu. Une onde en compression se réfléchit sur une pointe peu résistante en une onde en tension, qui peut générer des dommages au pieu.
- Adéquation du marteau: l'analyse permet d'établir la masse et la hauteur de chute requises du mouton.
- La masse du mouton est de l'ordre de 1% à 3% de la capacité statique à démontrer. La hauteur de chute est de l'ordre de 0,5 à 2,5 m.



**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**



## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION



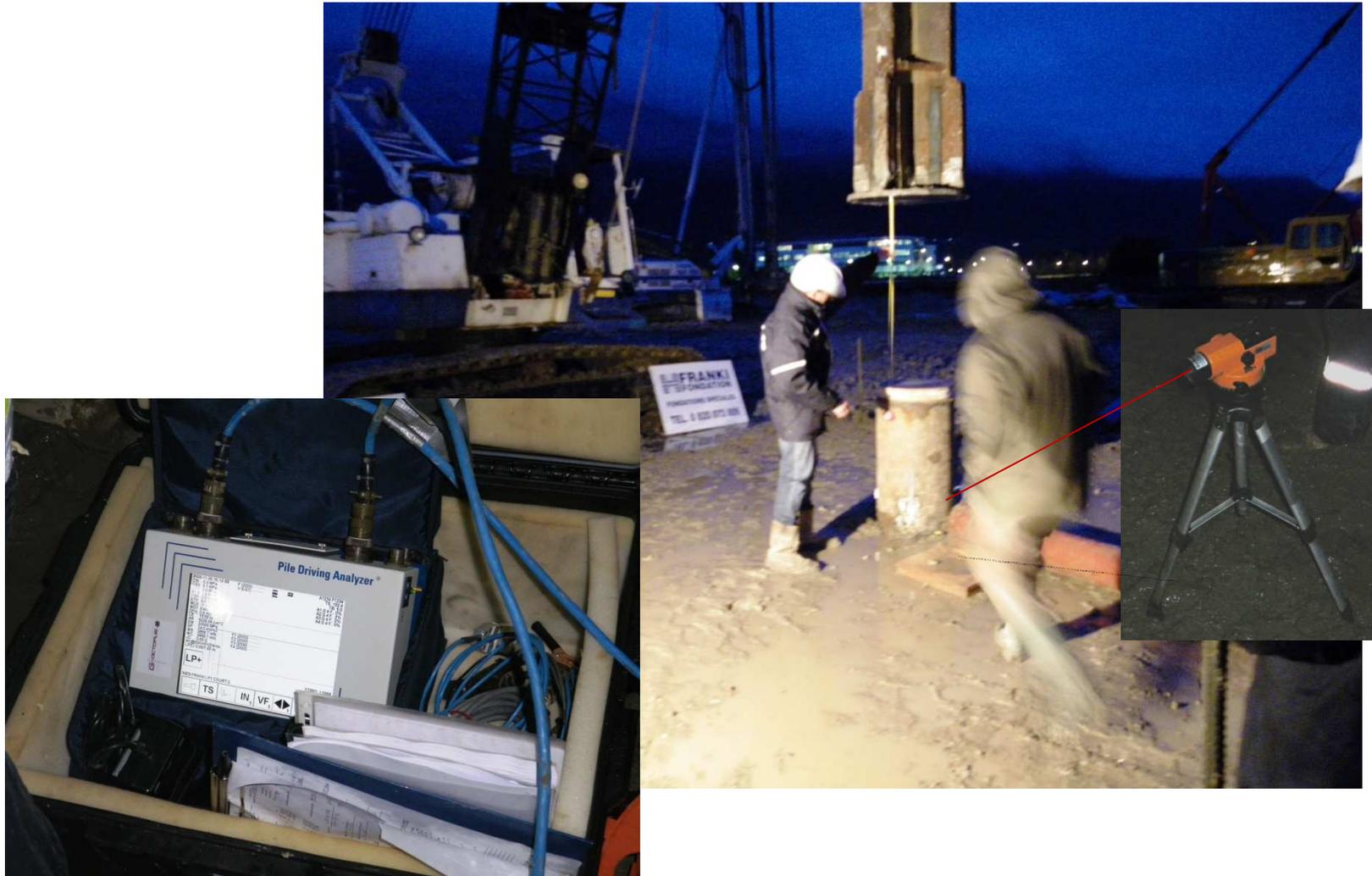
**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**

## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION



**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**

## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION



**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**

## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION

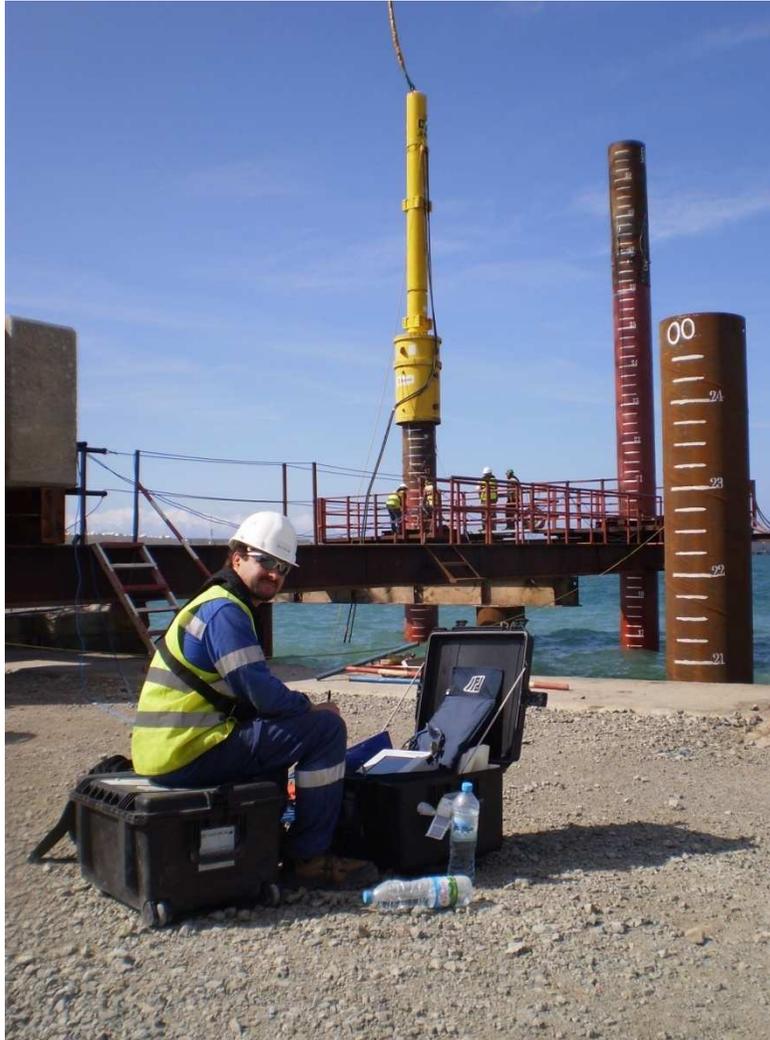


**Tous types de pieux  
peuvent être testés:**

- **acier, béton, bois**
- **battus, forés**

**Le mouton peut-être  
constitué d'un poids  
en chute libre  
(parfois fabriqué sur  
place) ou d'un  
marteau de battage**

## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION



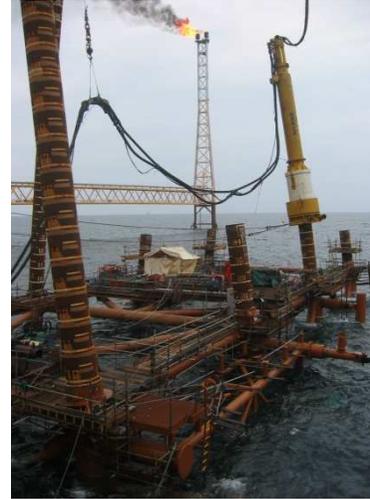
**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**

## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION



**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**

## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION



Les capacités  
statiques  
mesurées sont  
de l'ordre  
de 3000 t  
à 5000 t.

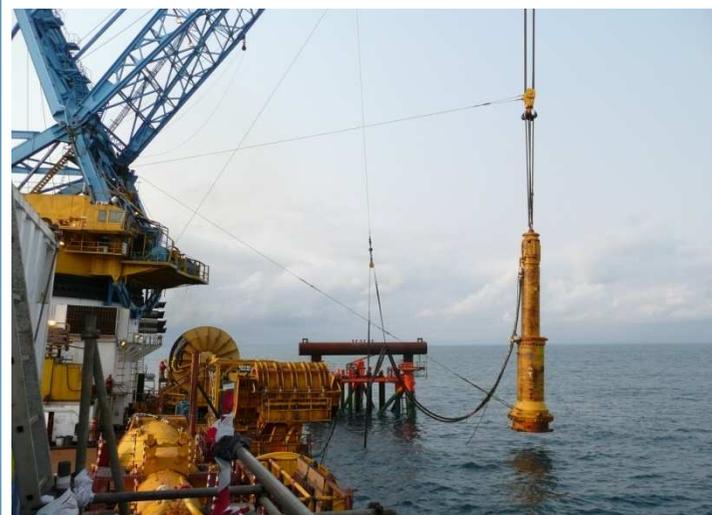
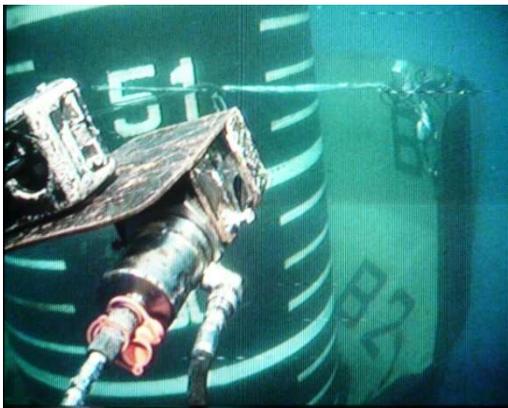
**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**

## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION



**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**

## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION



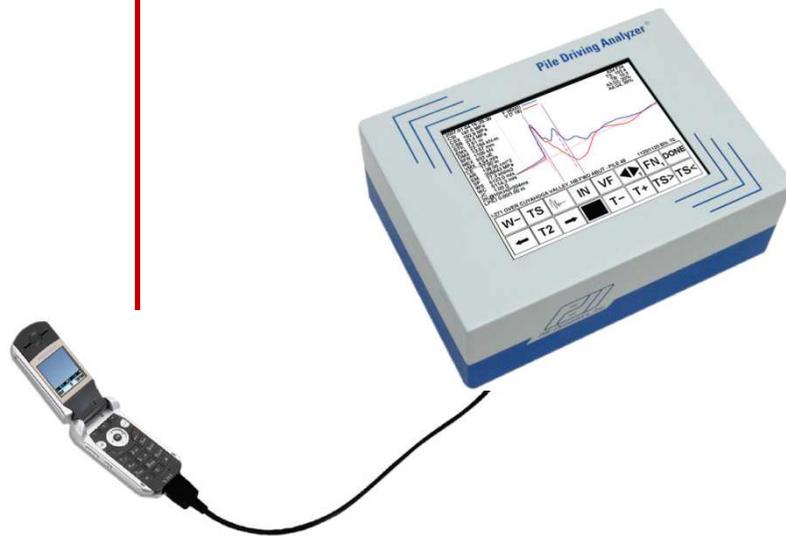
**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**



## MISE EN ŒUVRE : ACQUISITION

Les technologies de communication récentes ont été mises à profit pour les essais de chargement dynamique.

- Une connexion Bluetooth™ est utilisée pour connecter les capteurs à l'unité d'acquisition
- Une connexion par réseau téléphonique mobile ou WiFi est utilisée pour connecter l'unité d'acquisition à n'importe quel ordinateur pour un suivi des essais en temps réel.  
Il est tout à fait envisageable de former un opérateur à l'exécution des essais. L'acquisition des données étant suivie en temps réel par l'ingénieur au bureau.



**EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES**



# QUALITÉ DES DONNÉES

L'essai de chargement dynamique est un outil formidable de contrôle des pieux, cependant il connaît des conditions et des limitations d'usage qu'il est essentiel de bien comprendre, au risque sinon de décrédibiliser la méthodologie.

## 1- Qualité d'exécution

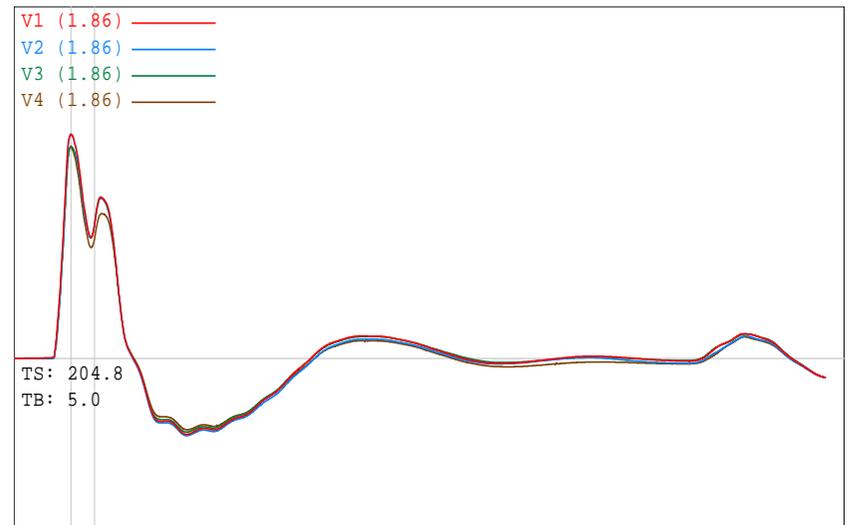
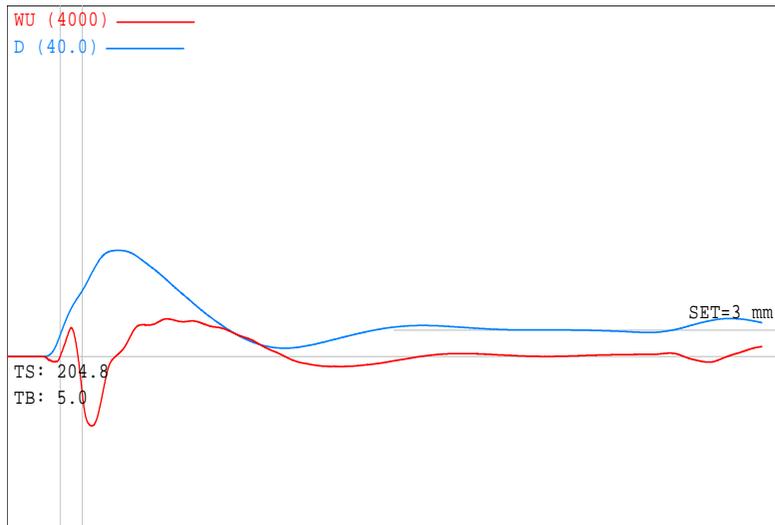
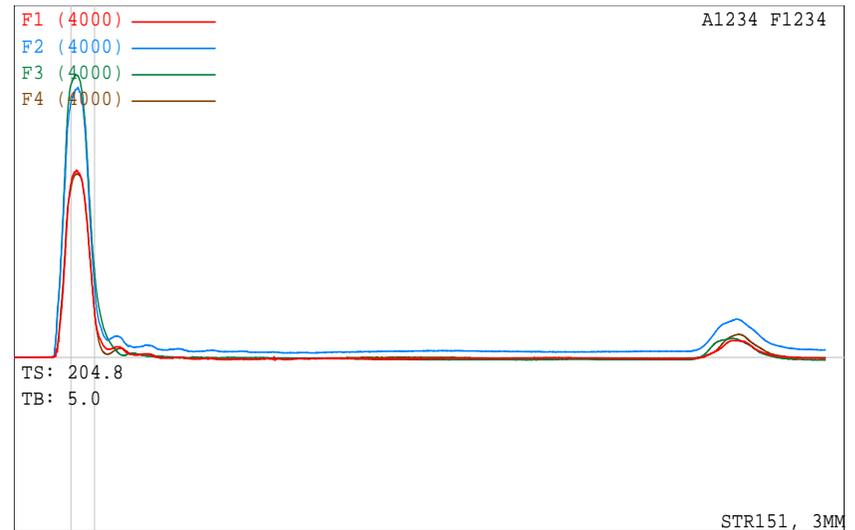
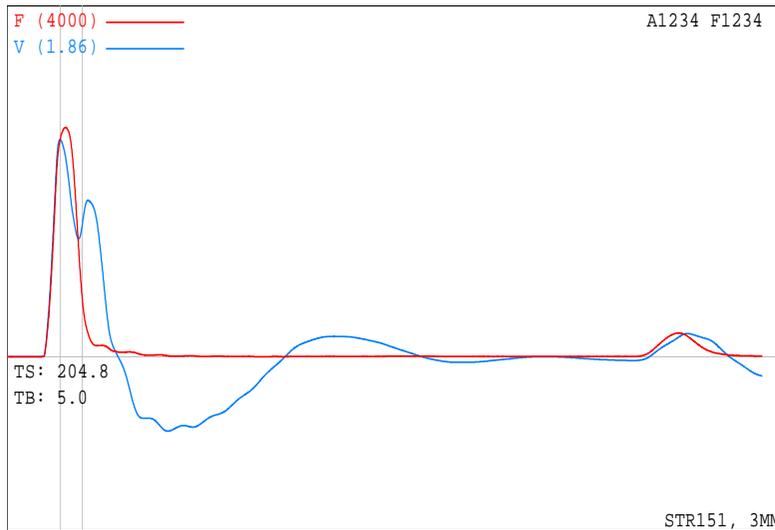
Le signal analysé (onde montante) est un différentiel des ondes mesurées (force et de vitesse). Il est donc essentiel de s'assurer de la précision de la mesure:

- Bonne fixation des capteurs
- Usage de quatre jauges quand cela est nécessaire, sur des pieux larges ou en cas d'impact excentré
- Usage d'une lunette de chantier pour mesurer le tassement final par coup.

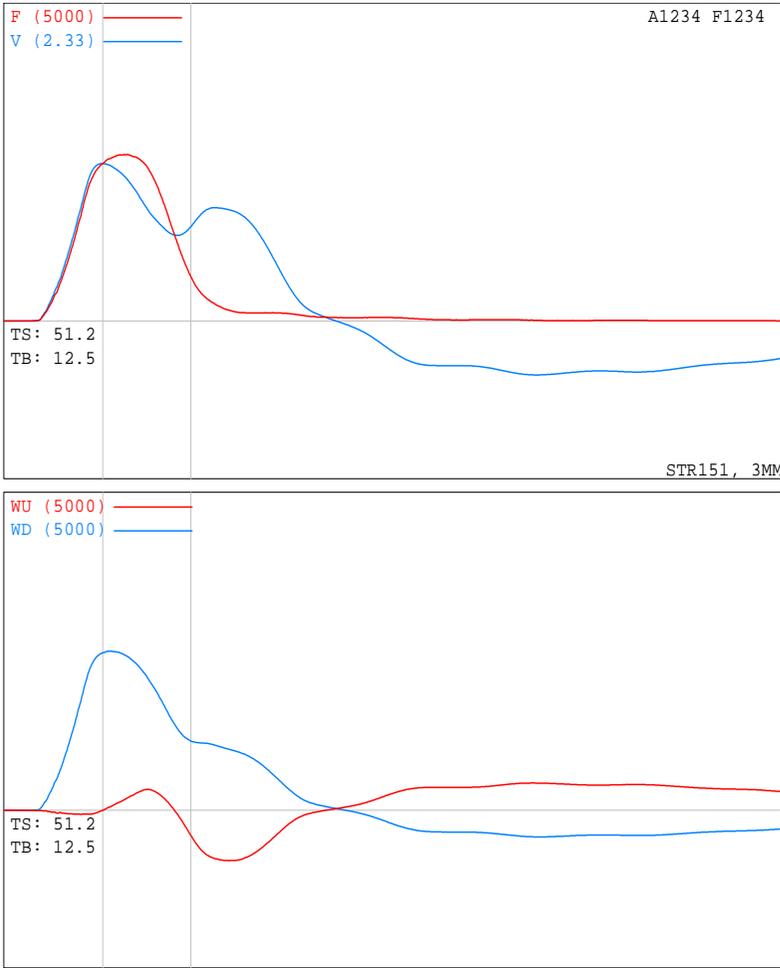
**2- Les critères objectifs de qualité** permettent une bonne évaluation de la qualité de l'instrumentation:

- Proportionnalité Force et Vitesse avant retour d'onde
- Retour à zéro en fin de signal des paramètres, notamment du déplacement,
- Cohérence entre tassement final mesuré par moyen optique et tassement obtenu par double intégration des accéléromètres
- Absence d'instabilité électrique
- Bonne répétitivité des signaux

# CONDITIONS ET RESTRICTIONS



# DONNÉES



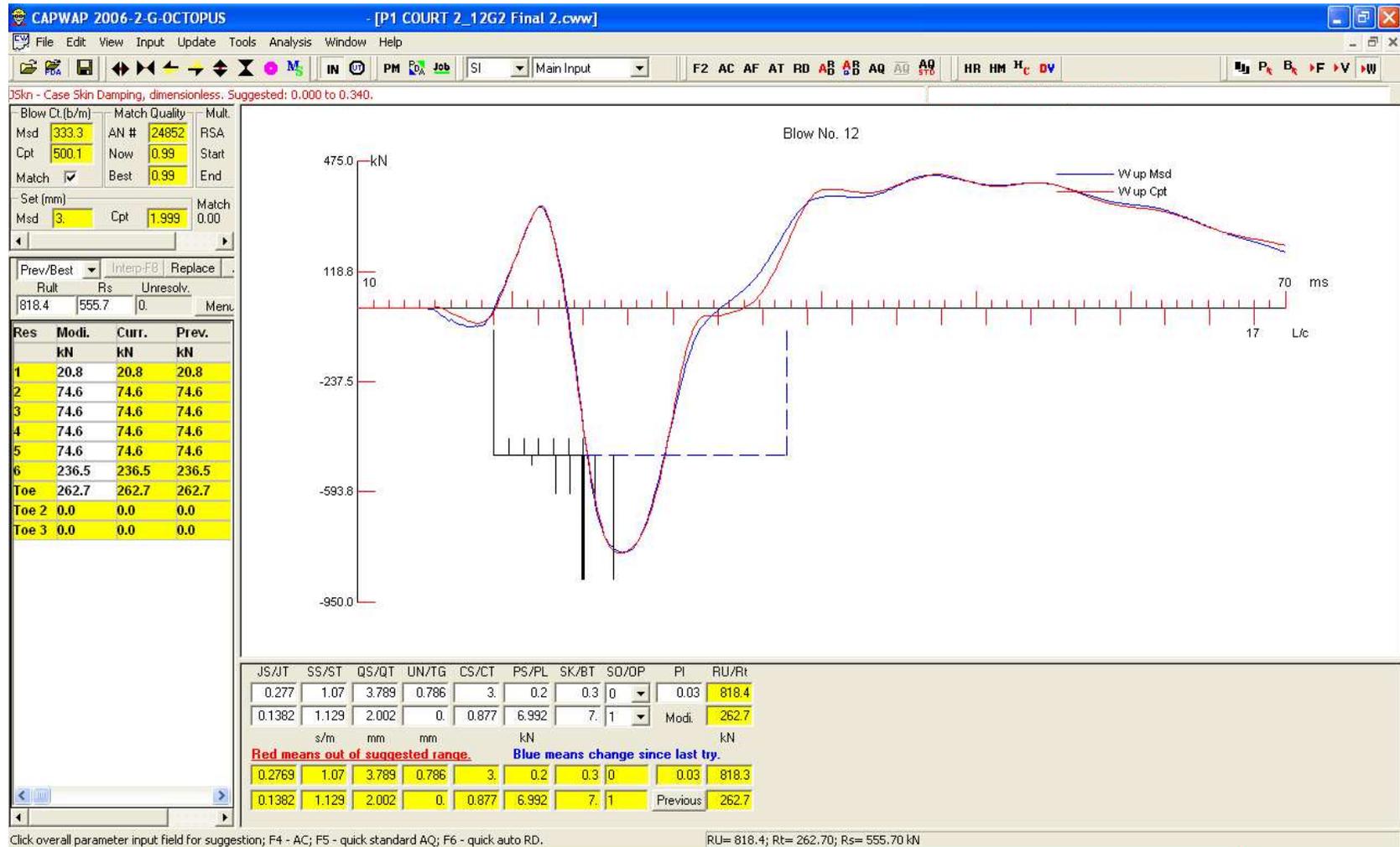
## **ANALYSE PAR CALAGE**

**L'analyse par calage consiste à modifier itérativement un modèle numérique de sol, jusqu'à faire coïncider l'onde réfléchie calculée à l'onde réfléchie mesurée.**

**On considère alors que le modèle numérique de sol ainsi obtenu est représentatif de l'interface pieu / sol.**

**Plusieurs calages sensiblement différents peuvent parfois être obtenus sur un même signal. Cependant les capacités portantes résultantes seront très proches.**

# ANALYSE PAR CALAGE

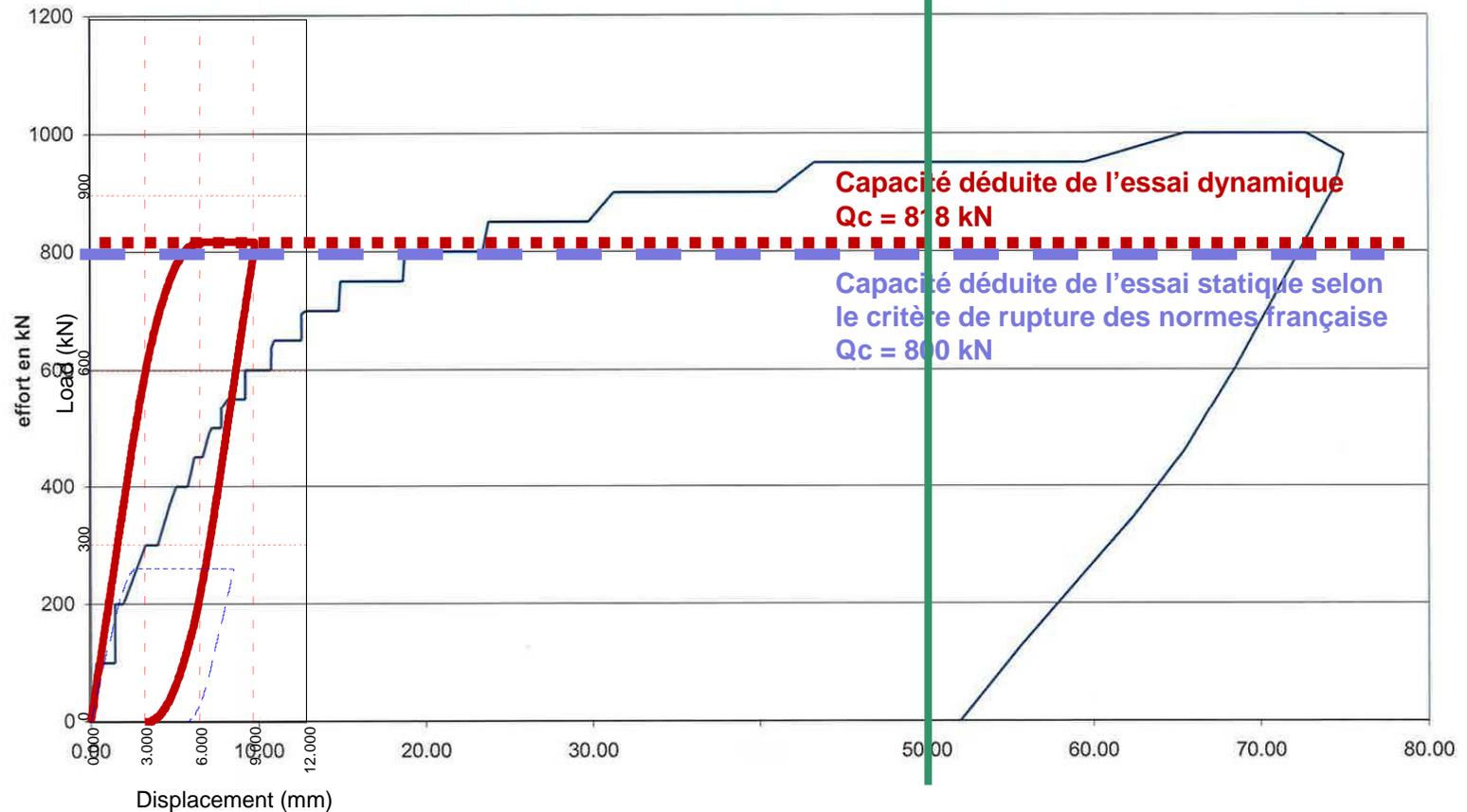


EQUIPEMENTS DE CONTROLE  
DES FONDATIONS PROFONDES

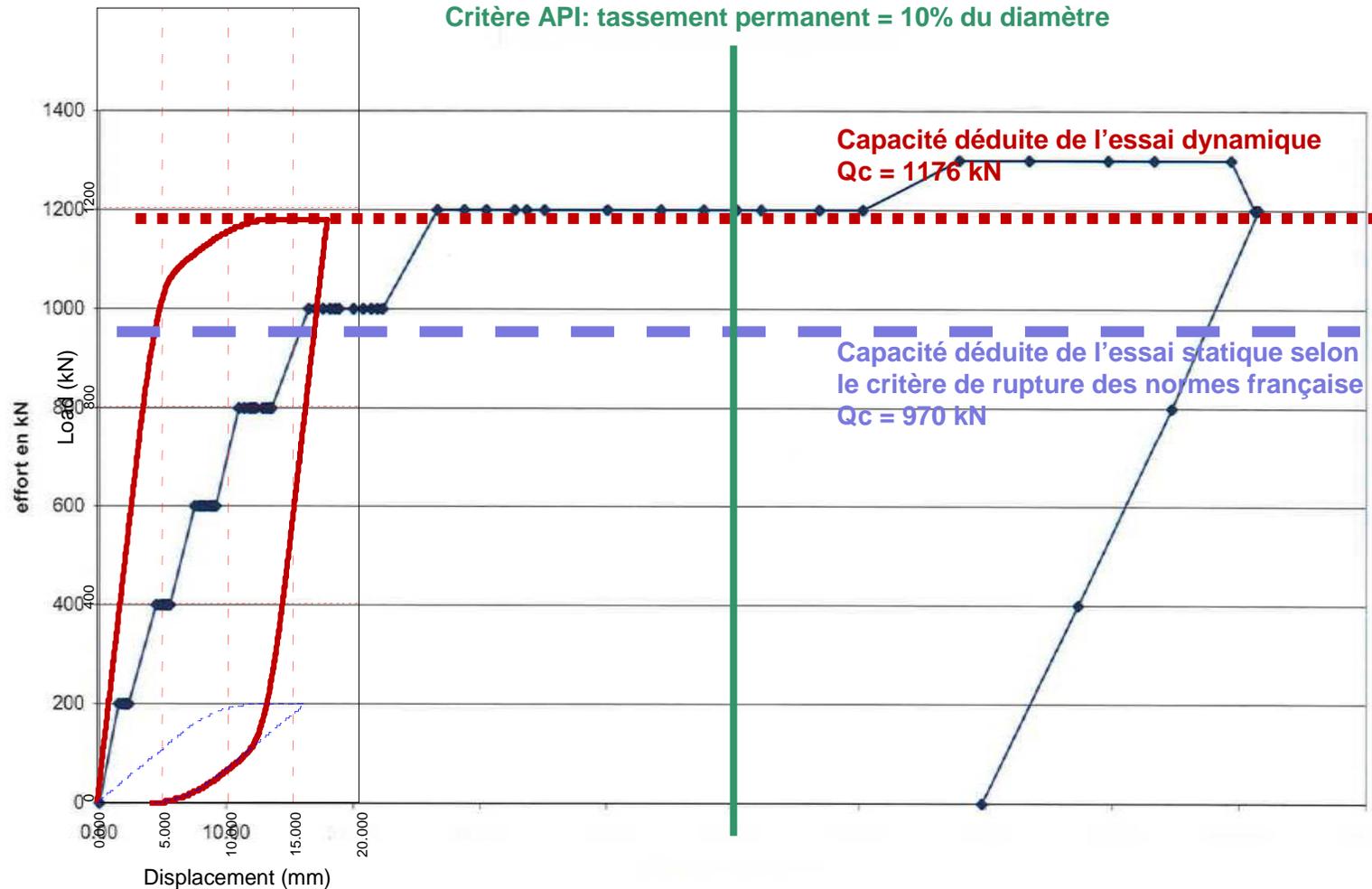


# CORRELATION RECENTE PIEU 1

Capacité selon le critère de l'API:  
tassement permanent = 10% du diamètre



## CORRELATION RECENTE PIEU 2



## CORRELATION RECENTE

On constate que les corrélations entre essais statiques et essais dynamiques sont globalement bonnes, mais les écarts tiennent principalement au choix arbitraire du critère de rupture, ou au temps de cicatrisation accordé aux sols.

Les essais dynamique corrélerent aussi bien avec les essais statiques que les essais statiques entre eux.

	CAPWAP	Statique France	Statique API
Pieu 1	818 kN	800 kN	940 kN
Pieu 2	1175 kN	970 kN	1200 kN

## CORRELATION RECENTE

Nous invitons les acteurs de l'industrie de la construction en France à se rassurer sur la fiabilité des essais de chargement dynamique en en faisant effectuer conjointement à un essai statique, comme recommandé par l'EC 7.

Nous exprimons le souhait que des normes européennes soient développées afin de favoriser une exécution de qualité, et vérifiable.

## CONDITIONS ET RESTRICTIONS

Le logiciel CAPWAP d'analyse par calage évalue la qualité du calage au moyen du paramètre MQ (Match Quality). Plus MQ est faible, meilleur est le calage. Un bon calage donne un MQ de l'ordre de 2 ou 3.

Cependant le paramètre MQ n'est pas une condition suffisante de la qualité du signal. Un bon calage peut parfois être obtenu avec des paramètres aberrants, une revue d'expert est parfois nécessaire.

Il existe une certification pour les exécutants d'essais de pieux: (cf [www.foundationQA.com](http://www.foundationQA.com)), qui sanctionne la connaissance des bonnes pratiques, ainsi que la compréhension des phénomènes théoriques.

## CONDITIONS ET RESTRICTIONS

### Conditions de mobilisation du sol

- Tassement final supérieur à une limite qui dépend du type de sol, mais qui est généralement comprise entre 2.5 et 5 mm: afin de s'assurer que toute la résistance du sol a été mobilisée, il est convenu qu'un tassement minimal de 2.5 à 5 mm doit être mesuré
- Tassement final inférieur à 12 mm. Au-delà de 12 mm, les modèles numériques de sol du logiciel CAPWAP ne sont plus adaptés.

### Cicatrisation des sols

L'essai mesure la capacité du pieu au moment de l'essai. Les sols remaniés, surtout les sols cohésifs, manifestent des propriétés temporairement dégradées, auxquelles il faut plusieurs semaines pour retrouver leurs caractéristiques de dimensionnement.

Les coups précédant le coups sélectionné contribuent à dégrader les sols.

## CONDITIONS ET RESTRICTIONS

### Distribution frottement / pointe

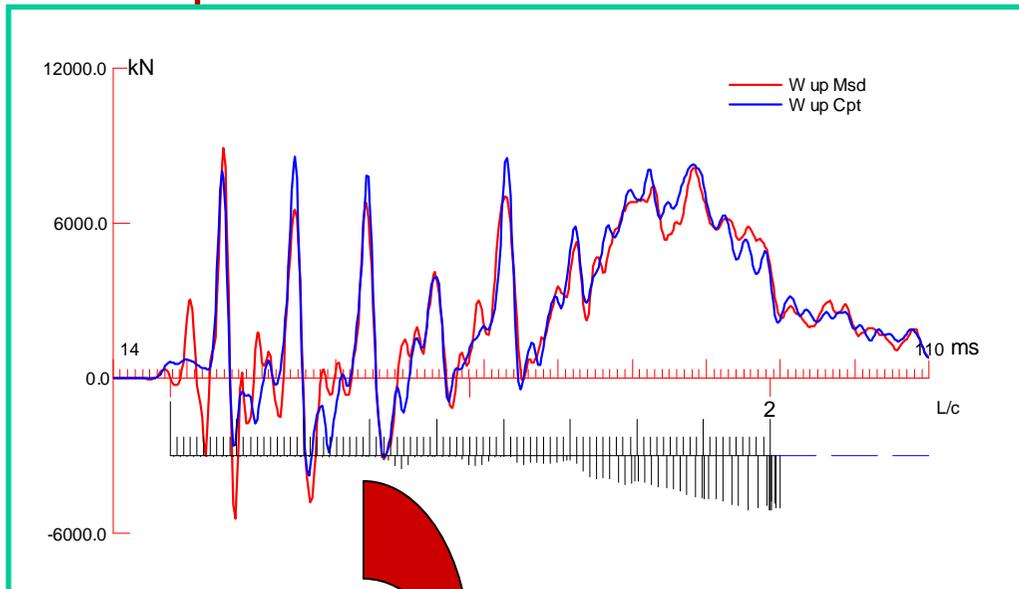
- La capacité portante résultant d'un essai dynamique jouit d'une bonne fiabilité, et d'une bonne précision, de l'ordre de +/- 10%.
- Cependant la répartition entre le frottement et la pointe est d'un niveau de précision inférieur. L'essai de chargement dynamique ne peut donc pas être utilisé pour l'évaluation de la capacité d'un pieu en tension.
- De même, la raideur du pieu telle que estimée par un essai dynamique ne donnera qu'un vague ordre de grandeur de la raideur statique.

*That's all, Folks!*  
*Questions?*

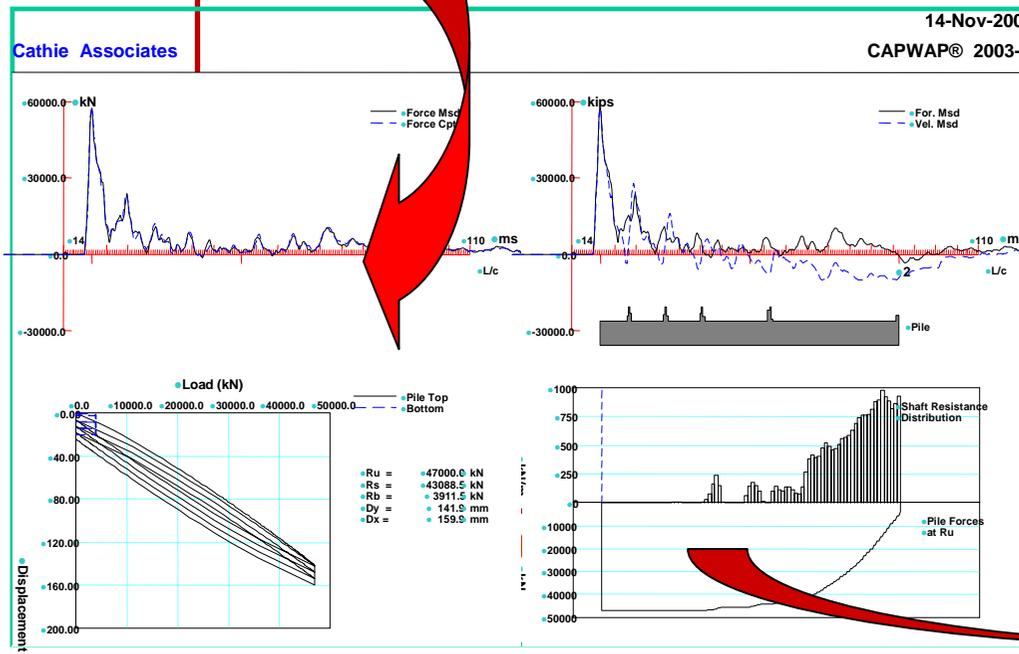
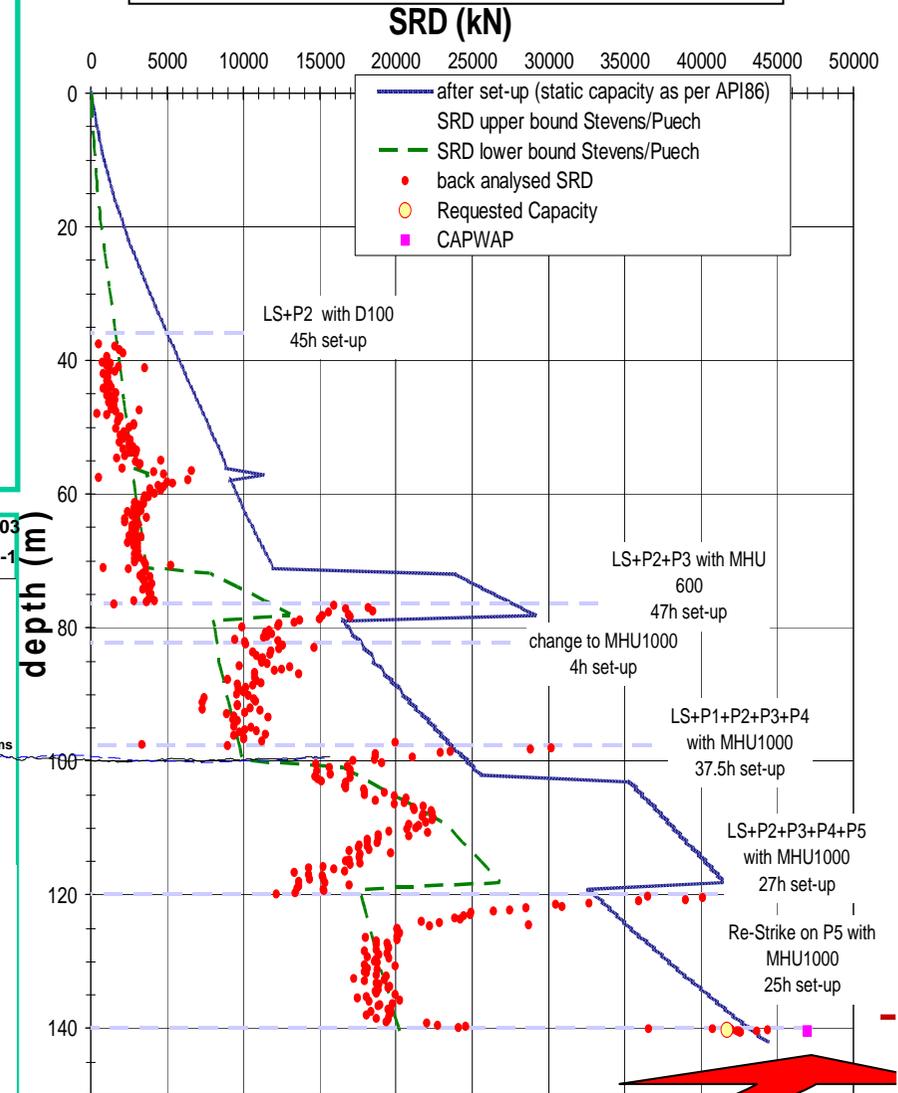
## Analyses avancées pour les projets de pieux battus

L'analyse globale se base sur les analyses préliminaires, ne considère pas un signal choisi, mais plutôt le nombre de coups donnés par incrément de pénétration, ainsi que l'énergie du marteau. Elle est plus grossière que l'analyse par calage, et ne devrait pas servir à établir la capacité d'un pieu, à moins d'avoir été calibrée au moyen d'essais statiques ou dynamiques. Elle permet cependant d'établir un profil de résistance du sol au battage en fonction de la pénétration du pieu.

# Pile Capacity Assessment by signal matching (CAPWAP)



## Back-Analysed SRD



## Analyses avancées pour les projets de pieux battus

**Sur les projets comprenant un grand nombre de pieux, dont généralement seulement une fraction est instrumentée,**

- un modèle numérique de comportement du sol au battage peut-être établi sur la base des résultats des analyses sur les pieux instrumentés. Ce modèle numérique permet d'établir une corrélation fiable entre les paramètres de battage (nombre de coups par 25 cm et énergie du marteau) et la capacité portante.
- le modèle numérique ainsi « calibré » peut alors être appliqué à tous les pieux si les sols sont homogènes. Des critères d'acceptation de pieux peuvent alors être établis sur la base des critères de battage.

# Bearing Graph

