

**GINGER**  
GROUPE INGENIERIE EUROPE

27/01/2010

Etudier  
Concevoir  
Conseiller  
Expertiser  
Développer durablement  
Valoriser  
Perenniser  
Enseigner  
Former



# **CFMS** **Journée Essais** **de Pieux**

**Raphaël de Thoury**  
**Dominique Vié**

EXPERTISE - INGENIERIE - CLES EN MAIN - MAINTENANCE

*Au cœur de la qualité de la vie*

BATIMENT - INFRASTRUCTURES - ENVIRONNEMENT - TELECOMS - DEVELOPPEMENT DURABLE

# Campagne d'essais déc 2009

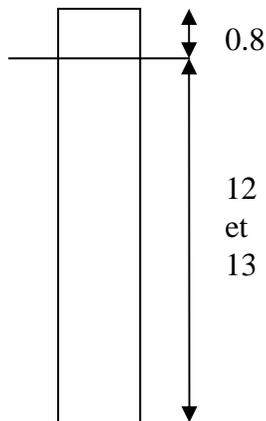
## ➤ Présentation de la campagne d'essais GINGER CEBTP – FRANKI Fondations / déc 2009 Chantier INES – Le Bourget du Lac (73)

- Objectifs : utilisation in situ sur même pieux d'essais  
PAX PDA / SIMBAT / Essais de chargement statiques
- Protocole :
  - | 1<sup>er</sup> jour : Tests de chargement dynamique PDA PAX par G-Octopus
  - | 2<sup>ème</sup> jour : Tests de chargement dynamique SIMBAT par Testconsult
  - | 3<sup>ème</sup> jour : Essais de chargement statique à rupture par GINGER CEBTP
- Terrain d'essais pour enregistrement de paramètres sur centrale d'acquisition pour R&D interne GINGER CEBTP

## ⇒ Caractéristiques du sol

- 0 - 1m Remblais / 1m – 12m argiles un peu sableuses et sables argileux / après 12m sables graveleux

## ⇒ Pieux



Chemisage : 12mm  
épaisseur  
Hauteur 1330mm (hyp)  
Ferrailage 7 HA 16  
Hauteur du coussin utilisé :  
67mm  
Ancrage dans sables  
graveleux

| Pieu 1 : réalisé à la tarière creuse, Ø 520mm  
ancrage 1m, initialement prévu 0.5 m avec charge  
admissible ELS 14 T et rupture 38 T

| Pieu 2 : réalisé à la tarière creuse, Ø 520mm  
ancrage 2m, prévu avec charge admissible ELS 32 T  
et rupture 76 T

## ⇒ Mouton

- Masse de 2.95 T lâché par une grue à chute libre

# Caractéristiques terrain et pieux



# PDA PAX

## ⇒ Instrumentation

- 4 jauges de contrainte et 4 accéléromètres répartis aux 4 points cardinaux
- 1 théodolite externe pour contrôle de l'enfoncement
- 1 système PDA PAX

## ⇒ Protocole

- Série de coups avec hauteur de chute croissante jusqu'à obtention d'un enfoncement de l'ordre de 5mm
- Sélection d'un coup mobilisant bien la capacité du pieu
- Analyse par calage via logiciel CAPWAP

## ⇒ Résultats

- Pieu 1 : capacité ultime 82 T
- Pieu 2 : capacité ultime 118 T

# SIMBAT

## ⇒ Instrumentation

- 2 jauges de contrainte et 2 accéléromètres diamétralement opposés, 1 cible de visée
- 1 théodolite pour mesure de l'enfoncement (relié)
- 1 système d'acquisition

## ⇒ Protocole

- Série de coups en croissance / décroissance jusqu'à obtention d'un enfoncement de l'ordre de 5mm
- Utilisation de l'ensemble des coups après élimination de certains coups de décroissance
- Analyse par calage via logiciel SIMBAT

## ⇒ Résultats

- Pieu 1 : capacité ultime 95 T
- Pieu 2 : capacité ultime 105 T

# Essais de chargement statique

## ➤ Dispositif

- 4 pieux de réaction
- 3 poutres métallique ancrée sur les pieux de réaction
- 1 vérin et 1 capteur de déplacement
- 1 système d'acquisition

## ➤ Protocole

- Suivant la norme NF P 94 150-1
  - | Cycle de préparation
  - | Cycle de chargement par palier jusqu'à rupture

## ➤ Résultats

- Pieu 1 : capacité ultime 80 T
- Pieu 2 : capacité ultime 97 T



# Conclusion des essais

## ⇒ Tableau récapitulatif

(en T)	PDA PAX	SIMBAT	Statique
Pieu 1	82	95	80
Pieu 2	118	105	97

⇒ Des matériels bien industrialisés et opérationnels

⇒ Des résultats relativement proches qui permettent d'obtenir une information sur la portance du pieu

⇒ La précision peut être encore améliorée et fera l'objet de futures recherches GINGER CEBTP

# Intérêt des essais dynamiques

## ⇒ Contrôle d'intégrité : NON

- Les techniques de contrôle par impédance sont plus adaptées
- Impédance et Transparence

## ⇒ Qualification du Sol : OUI

- Réalisation d'un pieu d'essai préalablement au dimensionnement des fondations  
(dans le cas de terrains où les essais classiques se révèlent trop incertains)

## ⇒ Vérification de la Portance : OUI

- Pour le contrôle des pieux de chantiers à forts enjeux
- En cas d'incertitude sur l'intégrité d'un pieu



Commentaire des résultats d'essai

# APERCU DES MESURES

# Une marge d'interprétation

## ➔ Paramètres retenus par PDI et Testconsult

		PDI		Testconsult		Ecart (%)	
		P1	P2	P1	P2	P1	P2
Lp	(m)	12.3	14.0	12.8	13.5	4.1%	-3.6%
S	(cm <sup>2</sup> )	2063.7	2064.0	<u>2123.7</u>	<u>2123.7</u>	2.9%	2.9%
E	(Gpa)	44.22	44.25	28.18	31.49	-36.3%	-28.8%
ES	(MN)	9126	9133	5985	6688	-34.4%	-26.8%
ρ	(kg/m <sup>3</sup> )	2446	2712	2300	2300	-6.0%	-15.2%
c	(m/s)	4251	4039	3500	3700	-17.7%	-8.4%
Zc	(MN.s/m)	2.146	2.260	1.710	1.807	-20.3%	-20.0%
ES/Zc	(m/s)	4252	4040	3501	3700		
2Lp/c	(ms)	5.79	6.93	7.31	7.30	26.4%	5.3%

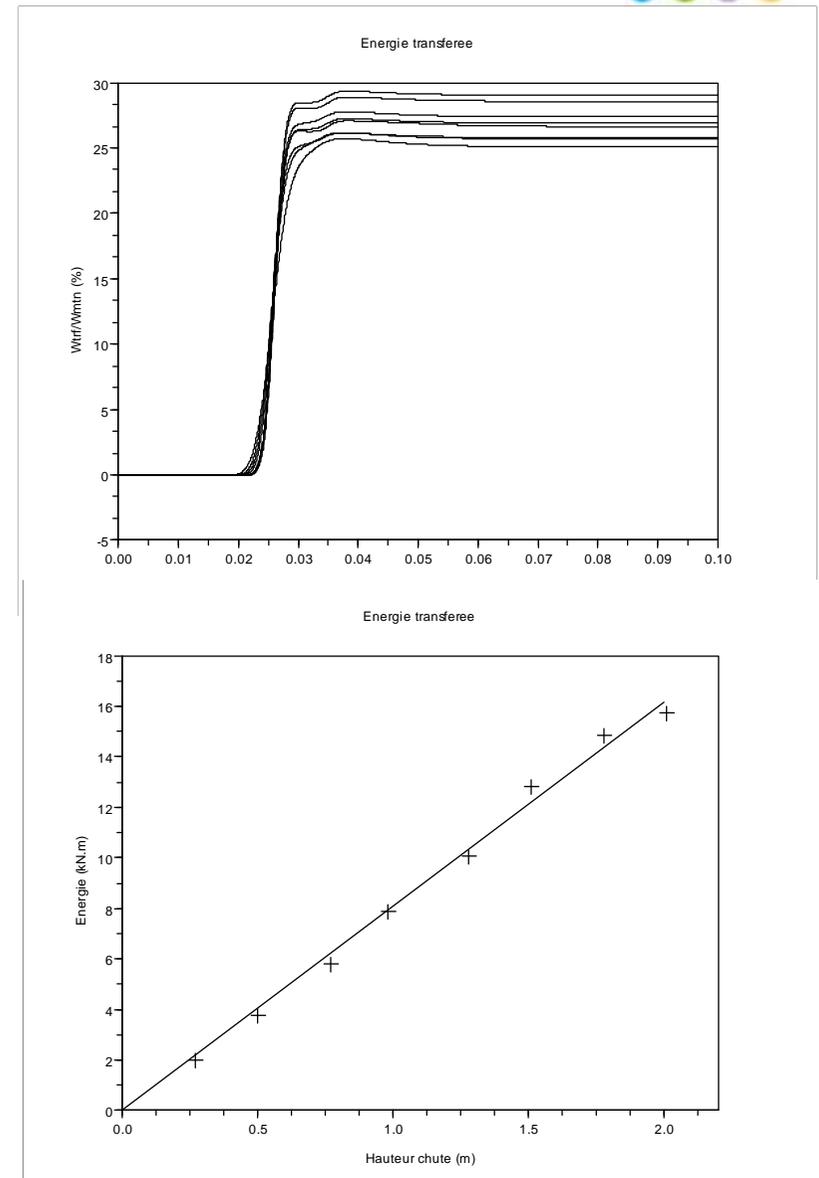
## Essai SIMBAT - Energie transmise

Rendement, fonction des caractéristiques du pieu et de la masse utilisée, ainsi que de conditions de contact. Usuellement de 25 à 60 %.

Evaluation du rendement dépend du choix du module de la tête de pieu. Dans le cas présent on obtient :

- 28 % pour  $ES = 6700 \text{ MN}$
- 38 % pour  $ES = 9130 \text{ MN}$

La valeur maximale de l'énergie (énergie d'impact) varie bien linéairement avec la hauteur de chute du mouton.





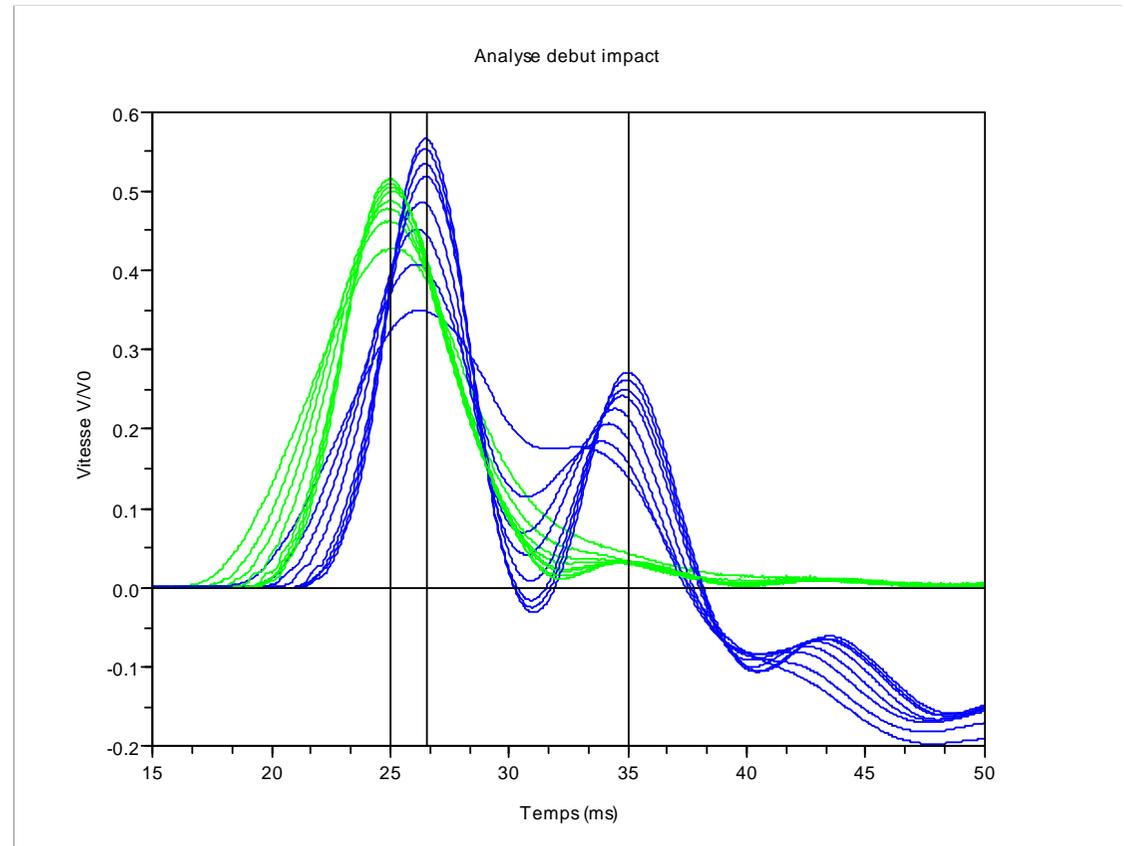
Vitesse et déformation rapportées à la vitesse d'impact  $V_0$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2W_{tr}}{M}}$$

Déformations multipliées par un coefficient arbitraire (4000 m/s) pour comparaison aux vitesses.

### Constatations :

- Décalage vitesse et déformation (1,5 ms)
- 2 maxima de la vitesse (8,5 ms)
- Homogénéité des valeurs maximales relatives de déformation
- Augmentation de la durée de l'impact
- Fortes variations des amplitudes relatives de la vitesse
- Réduction du délai d'écho !



### Hypothèse

**Mouton déformable**

**$C = 5250$  m/s et  $L \# 3,50$  m**

**$\gg \Delta t \# 1,3$  ms**



### Norme NF

#### 2 estimations de la vitesse

- proportionnalité vitesse et déformation au début de l'impact (pas d'onde montante)
- délai impact  $\leftrightarrow$  écho
- écart  $< 10\%$

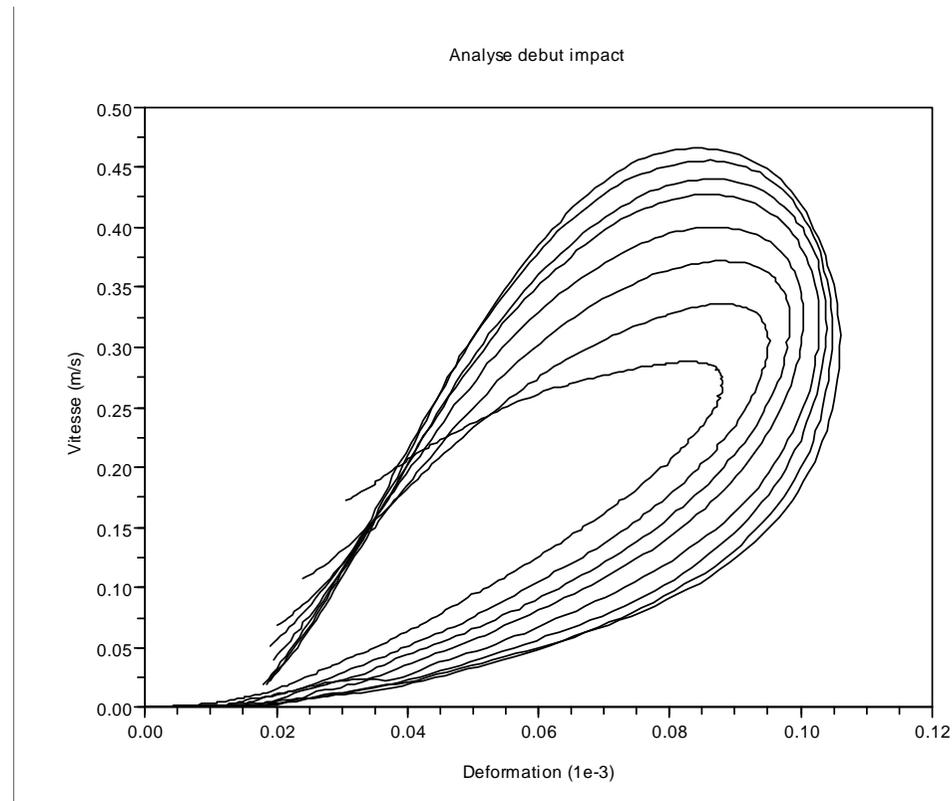
#### Ici :

- Pas de proportionnalité vitesse déformation
- Délai impact écho 8,5 ms pour 13,4 m soit  $c = 3153$  m/s !!

### NB

Les mesures PDI et Testconsult ne montrent aucun décalage entre vitesse et déformation

Le délai entre impact et écho est du même ordre de grandeur (alors que les vitesses prises en compte sont bien supérieures)



# Vitesse de propagation en tête de pieu

Prise en compte déformation de la masse tombante : force nulle en tête du mouton

Simplification : section de mesure située en tête de pieu

$$\alpha = \frac{Z_m}{Z_p} \quad \Delta t = \frac{2h}{c_m}$$

$$\alpha[V(t + \Delta t) - V(t - \Delta t)] = -c_p[\varepsilon(t + \Delta t) + \varepsilon(t - \Delta t)]$$

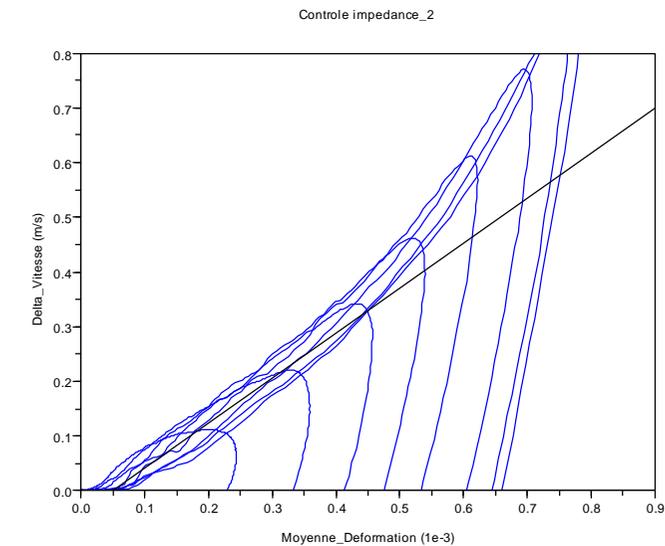
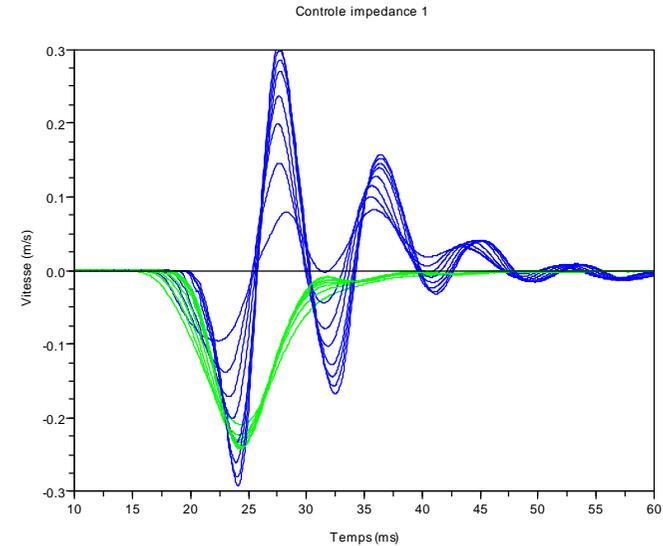
On obtient (graphique ci-contre)

$$c_p = 0,706 \cdot \alpha$$

Connaissant la densité et la vitesse de propagation de l'acier et du béton ainsi que la section en tête de pieu, on peut en déduire une valeur de la section courante de la masse tombante

Avec  $c = 4000$  m/s pour le pieu

on trouve  $S = 445$  cm<sup>2</sup>



## Onde montante et descendante



### Onde montante dès le début de l'impact

Régime oscillatoire qui peut correspondre à la longueur du pieu

$$\Delta t = 7,8 \text{ ms}$$

$$L_p = 13,40 \text{ m}$$

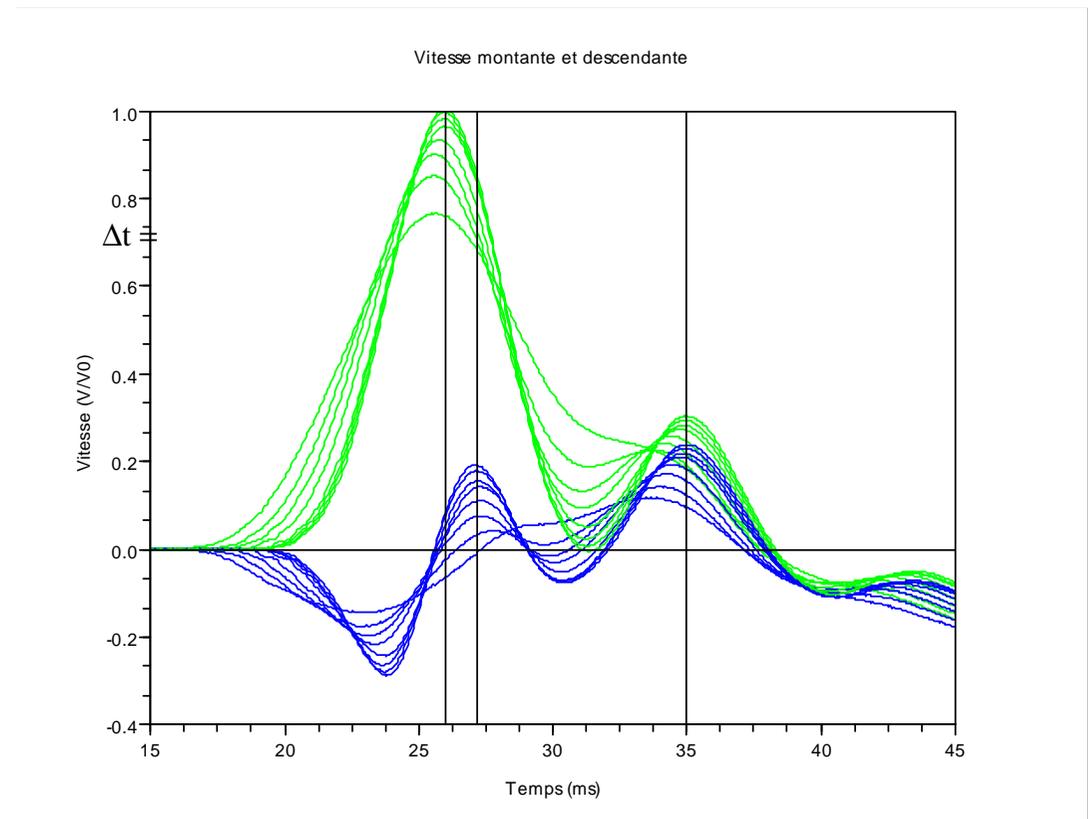
$$C_p = 3450 \text{ m/s}$$

Echo onde descendante onde montante

$$\Delta t = 9,0 \text{ ms}$$

$$L_p = 13,40 \text{ m}$$

$$C_p = 3060 \text{ m/s}$$



## Résistance dynamique

Rdy varie avec l'énergie d'impact  
 >> Essai à énergie variable



### Diagramme typique

**Force descendante**  
**Variation parabolique**

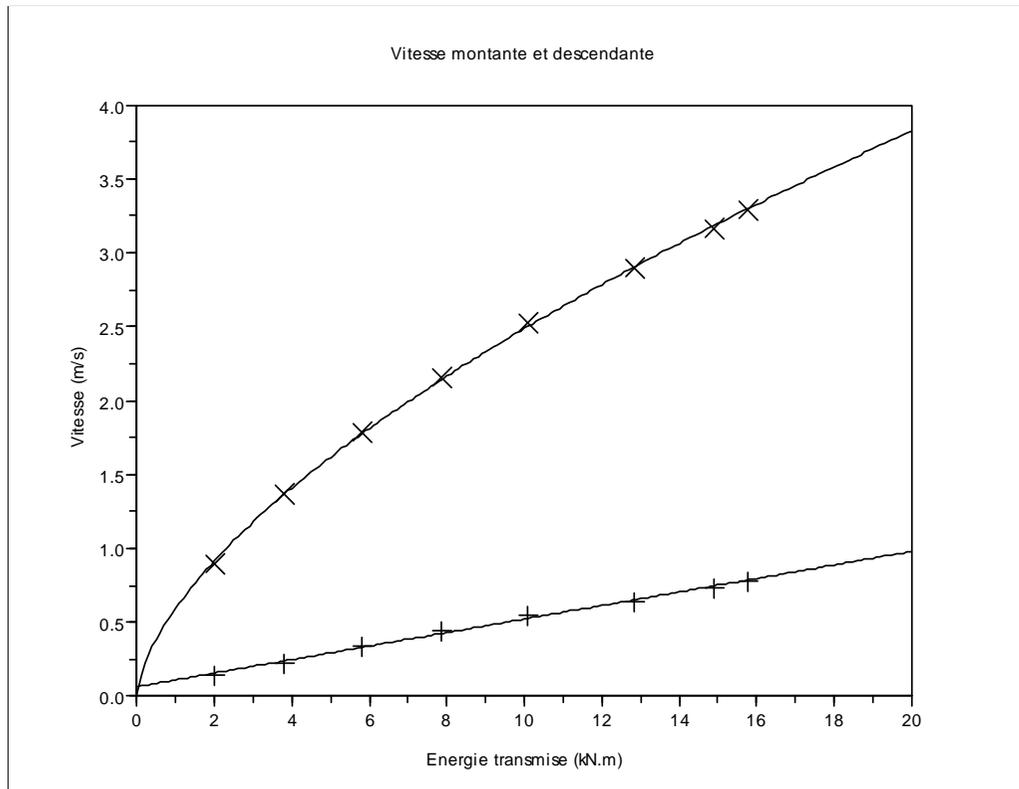
$$F_{ds} = k\sqrt{H}$$

**Force montante**  
**Variation linéaire**

Ici

$$F_{ds} = 0,557 \cdot W_{tr}^{0,63}$$

$$F_{mt} = \frac{4,61 + 7,24W_{tr}}{100}$$





## Estimation rapide de la capacité portante statique

# METHODE « PAQUET »



⇒ **Essai à énergie variable**

⇒ **Relation linéaire  $R_{dy} / E_p$**

- $R_{stat} = R_{dy} - K E_p$

- $E_p$  = enfoncement par choc

⇒ **Critère de pondération**

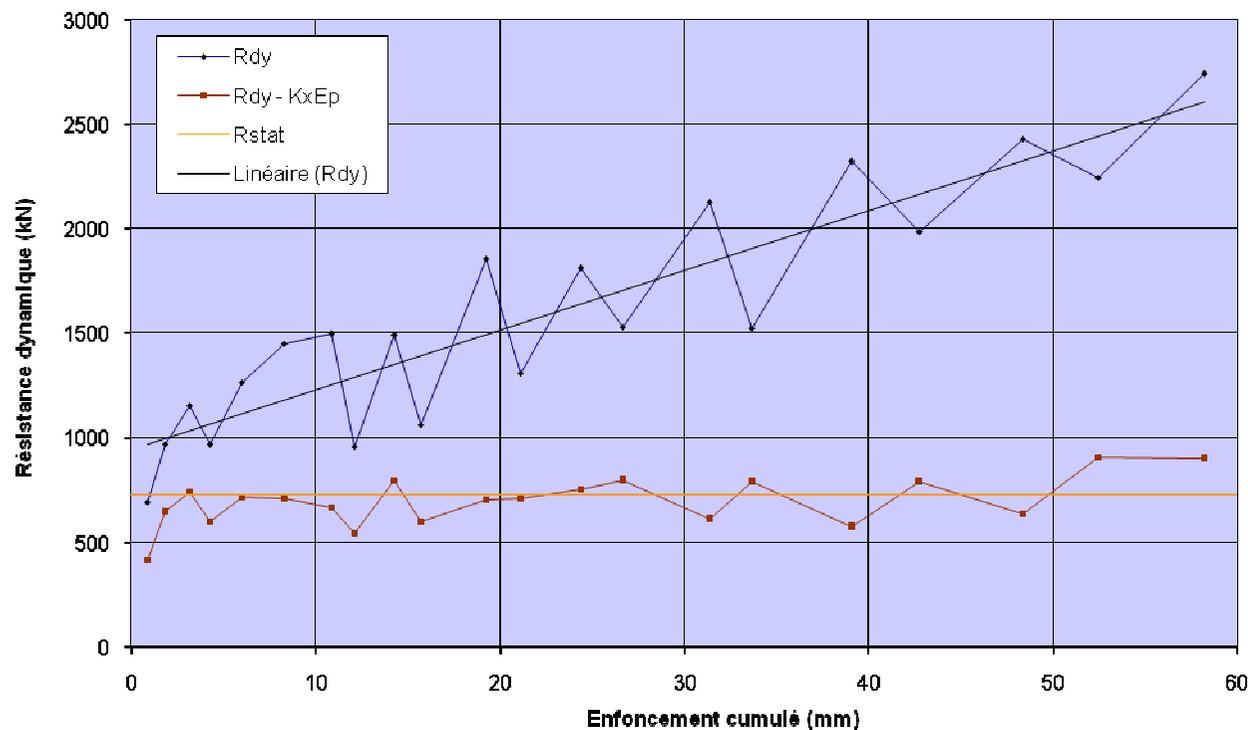
- Valeurs retenues au-delà d'un enfoncement cumulé à fixer

# Résistance statique - Méthode « Paquet »

Régression linéaire	Pieu 1	685 kN
Pcum_min (mm)	15 $\sigma\epsilon$ (kN)	112.2
n	12 Xm (mm)	3.662
Pente (kN/mm)	322.8 $\sigma x$ (mm)	1.491
Constante (kN)	730.3 $\Delta C$ (kN)	<u>24.782</u>
	tn-2	1.812

	Hc	Pen	Pcum	Rdv
	m	mm	mm	kN
1	0.3	0.86	0.86	690
2	0.5	1.00	1.86	970
3	0.7	1.28	3.14	1157
4	0.5	1.14	4.28	967
5	0.8	1.71	5.99	1267
6	1	2.28	8.27	1448
7	1	2.57	10.84	1497
8	1	1.28	12.12	958
9	1.2	2.14	14.26	1490
10	0.6	1.43	15.69	1062
11	1.4	3.57	19.26	1857
12	0.8	1.85	21.11	1308
13	1.5	3.28	24.39	1811
14	1	2.28	26.67	1530
15	1.7	4.71	31.38	2129
16	1	2.28	33.66	1524
17	2	5.42	39.08	2322
18	1.5	3.71	42.79	1985
19	2	5.56	48.35	2430
20	1.5	4.14	52.49	2246
21	2	5.71	58.20	2742

Pieu 1 - Estimation de la capacité portante

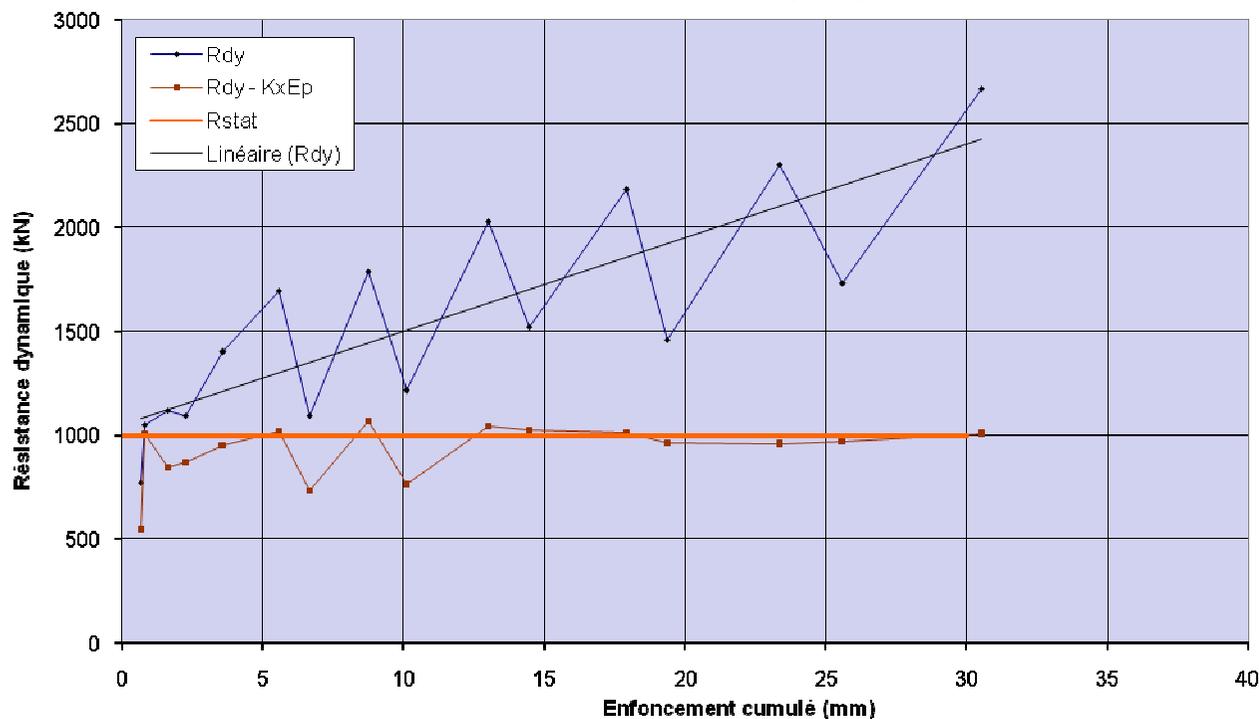


# Résistance statique - Méthode « Paquet »

Régression linéaire	Pieu 2	972 kN	
Pc_min (mm)	13	$\sigma\epsilon$ (kN)	33.7
n	7	Xm (mm)	2.912
Pente (MN/m)	338.7	$\sigma x$ (mm)	1.296
Constante (kN)	996.3	$\Delta C$ (kN)	<u>11.86</u>
		tn-2	2.015

	Hc	Pen	Pcum	Rdy
	m	mm	mm	kN
1	0.3	0.66	0.66	769
2	0.5	0.13	0.79	1049
3	0.7	0.8	1.59	1116
4	0.5	0.66	2.25	1094
5	0.8	1.33	3.58	1400
6	1	1.99	5.57	1694
7	0.5	1.06	6.63	1091
8	1.2	2.12	8.75	1785
9	0.6	1.33	10.08	1214
10	1.4	2.92	13	2031
11	0.8	1.46	14.46	1520
12	1.5	3.45	17.91	2183
13	1	1.46	19.37	1459
14	1.7	3.98	23.35	2302
15	1	2.25	25.6	1732
16	2	4.91	30.51	2666

Pieu 2 - Estimation de la capacité portante





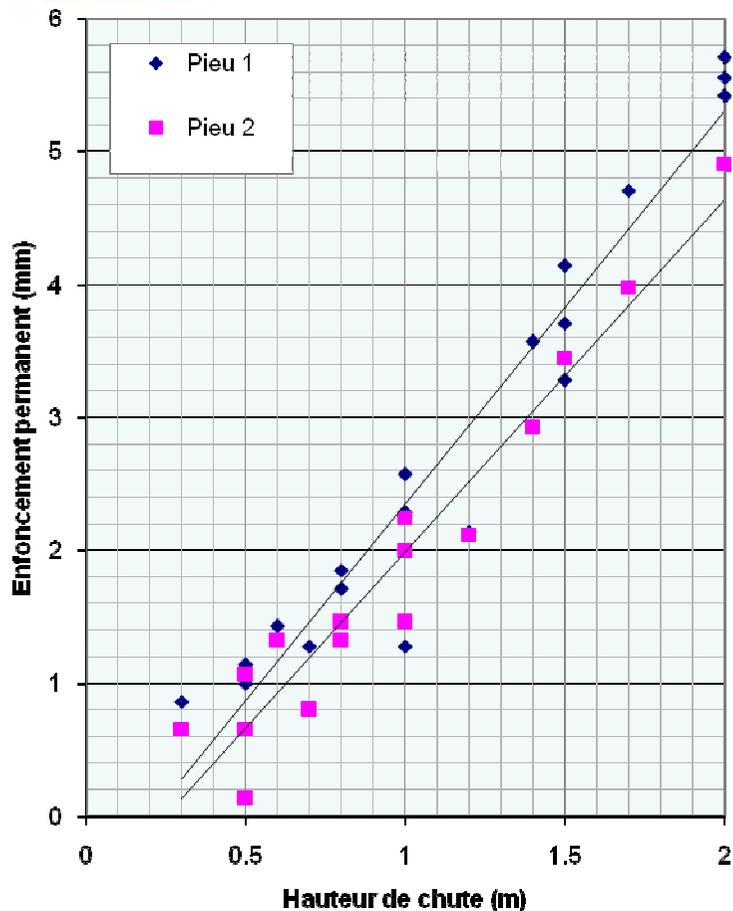
## ⇒ Synthèse résultats

### ■ Marge d'interprétation

Pieu	Statique	Testconsult	Regression
N°1	80	95	69,8
N°2	97	105	99,1

## ⇒ Nécessité de critères

Pieu	Ep_min	% $\phi$	Ep_max	% $\phi$
N°1	13	2,5	60	5,9
N°2	15	2,9	31	11,5



## Relation linéaire entre hauteur de chute et enfoncement permanent

- Un enfoncement résiduel peut souvent être constaté dès les 1ers chocs
- En tant que critère pour le dimensionnement de l'essai et son interprétation, il peut être remplacé par la hauteur de chute ou mieux encore par l'énergie transmise



Conclusions - Propositions

# **DIMENSIONNEMENT DES ESSAIS DYNAMIQUES**



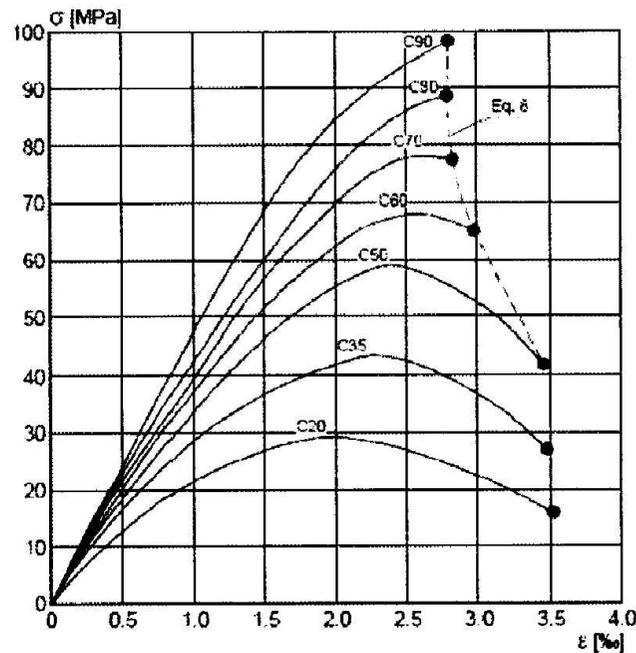
### ⇒ Principe

- Energie transmise proportionnelle à la hauteur de chute (rendement)
- Déformation maximale # indépendante de la masse
- Eviter l'endommagement du pieu
- Objectif énergie transmise à caler par rapport au statique



## ➔ Déformation maximale

- Pieu en béton EC2  $f_{ck} < 50$  MPa
- $\varepsilon < 750 \mu\text{def}$



$\sigma/f_{ck}$ (%)	$\varepsilon$ ( $\mu\text{def}$ )
90	1368
80	1106
70	905
60	735



## ⇒ Hypothèses

- Rendement à priori  $\lambda = 30 \%$
- Vitesse de propagation  $c=4000$  m/s
- Identification énergie cinétique / énergie transmise

$$\frac{1}{2}MV_0^2 = \lambda MgH_c$$

- Au début de l'impact  $V=c\varepsilon$

$$H_{\max} = \frac{(c\varepsilon_{\max})^2}{2\lambda g} \approx 1,50m$$



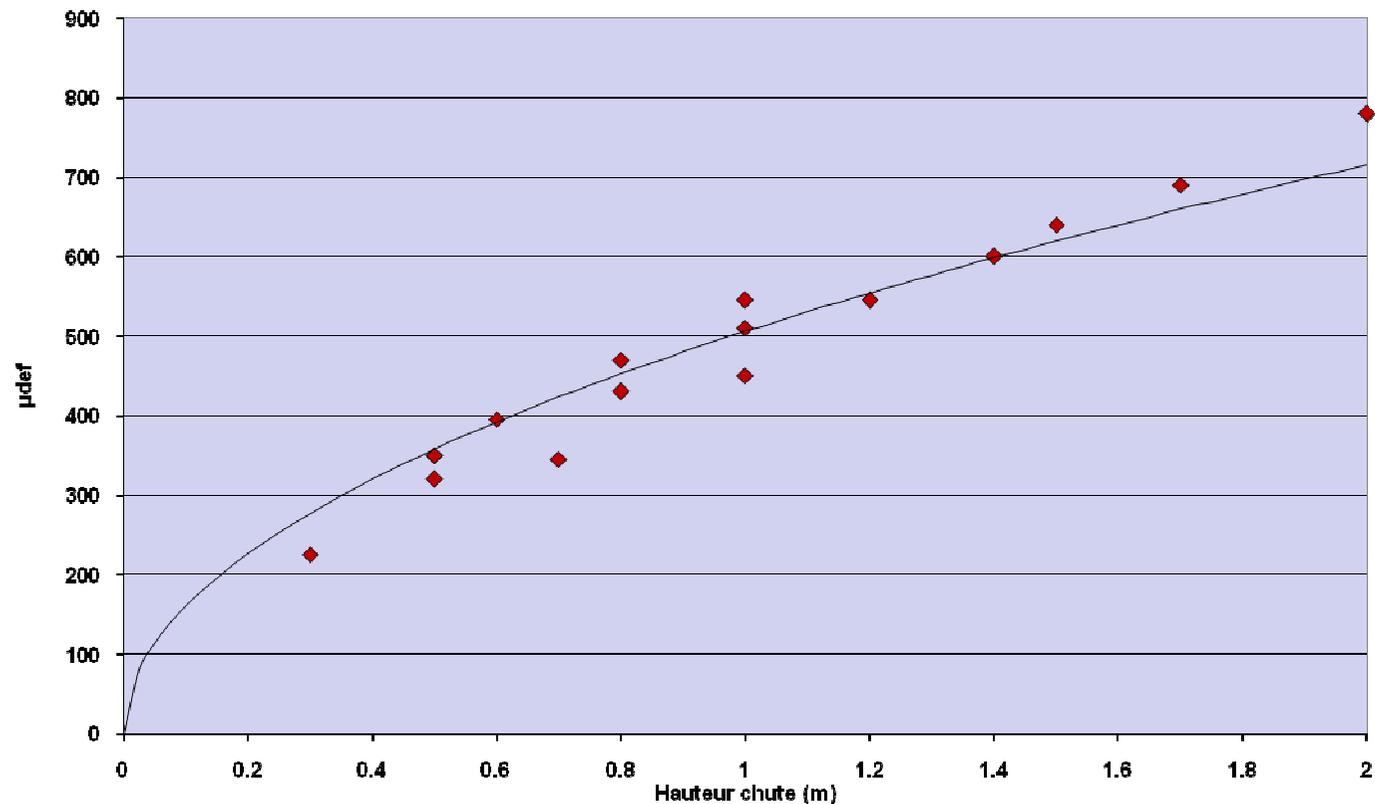
## ➔ Pour validation : pieu n°2

Attention au centrage de la masse



Contrôle des déformations de chaque jauge

Pieu 2 - Déformations maximales





## ⇒ Critère d'énergie à transmettre

- Base statique :

$$W_{stat} = \frac{\phi}{10} Q_{rupt}$$

- Choix de la masse

$$M \geq \frac{\phi Q_{rupt}}{10\lambda g H_{max}}$$

- Affiner l'estimation de  $W_{stat}$  pour éviter des masses trop importantes



## ➔ Application

Pieu	Statique	M (t)	W (kNm)
N°1	38	4,39	65
N°2	76	8,78	129

## ➔ Validation

Pieu	Nc	Hm (m)	$\varepsilon$ ( $\mu\text{def}$ )	Wm (kJ)	$\Sigma 1W$ (kJ)	$\Sigma 2W$ (kJ)
N°1	21	2,0		58	202	695
N°2	16	2,0	780	58	217	449



### ⇒ Proposition

- Méthode de base : estimation par excès
- Réduction si essai à énergie variable