

# Ingénierie de battage

Martin Hammann

# Ingénierie de battage

## Prédiction de battage Problématiques particulières

26 mars 2014 – Martin Hammann

# Ingénierie de battage : définition

L'ingénierie de battage consiste à :

**prédire les divers phénomènes intervenant dans le battage d'un pieu.**

Dans le but de :

- **Optimiser** les moyens mobilisés :
  - taille du marteau et de la grue,
  - épaisseur du pieu, souvent dimensionné au battage
- **Réduire les risques** de dommage ou d'arrêt de chantier.

# Catalogue des risques d'un chantier de battage

Ce qui peut mal se passer :

- Contraintes excessives : dommage en pointe de pieu
- Contrainte excessive : crack dans un pieu béton
- Refus prématuré ou incapacité à redémarrer après arrêt de battage, fatigue de l'acier
- Pénétration sous poids propre / free-fall (offshore)

# Catalogue des risques d'un chantier de battage



**Domage en pointe**

# Catalogue des risques d'un chantier de battage



**2h de battage ...**



**ou 2 jours de forage**

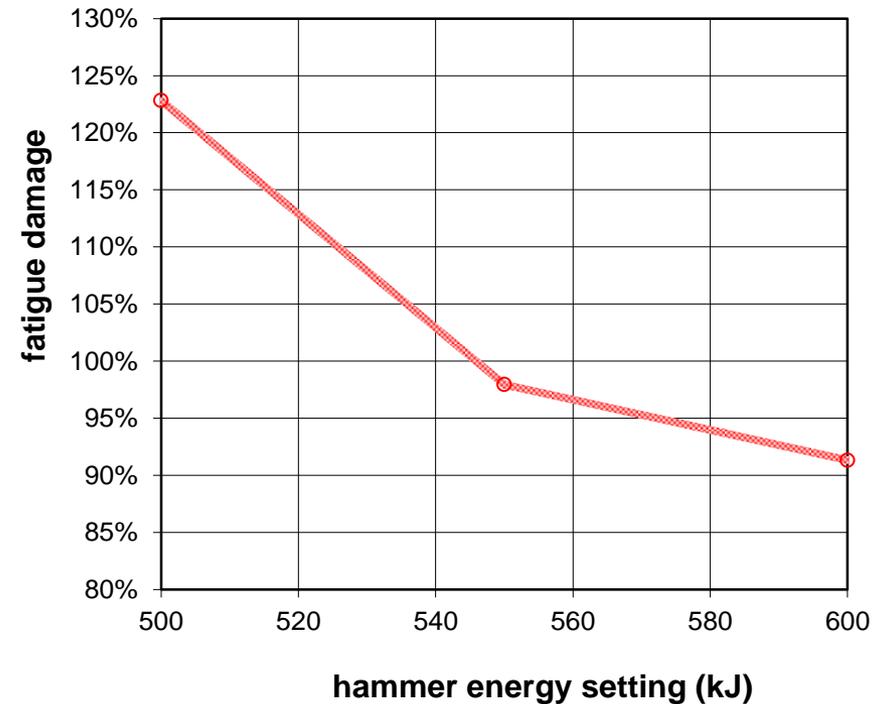
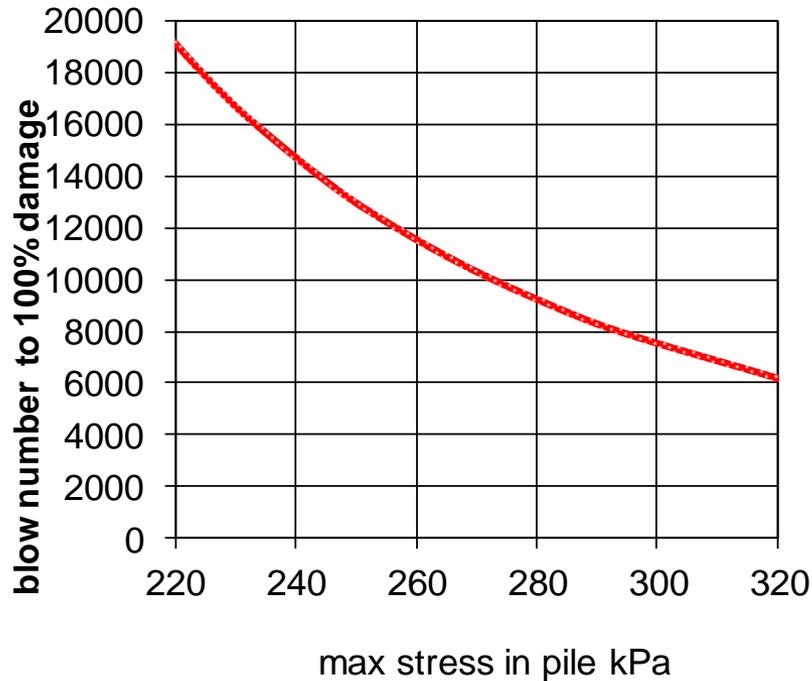
**Refus ou dommage en pointe**

# Catalogue des risques d'un chantier de battage



**Refus prématuré**

# Catalogue des risques d'un chantier de battage



## Domage à la fatigue dans le pieu

# FORMULES DE BATTAGE

- Principe : travail effectué par le marteau = énergie appliquée

*P<sub>u</sub> Résistance du sol*  $\propto \frac{\text{energie appliquée}}{\text{enfoncement généré}}$

$$P_u = \frac{e_h E_h}{s} \left( \frac{1}{1 + \left(\frac{W_p}{W_r}\right)} \right) \text{ (Formule des Hollandais)}$$

$$P_u = \frac{e_h E_h}{s + \frac{s_1}{2}} \left( \frac{1}{1 + \left(\frac{W_p}{W_r}\right)} \right) \text{ (Crandall)} \quad P_u = \frac{e_h E_h}{s + s_1} \left( \frac{1}{1 + \left(\frac{W_p}{W_r}\right)} \right) \text{ (Engineering News)}$$

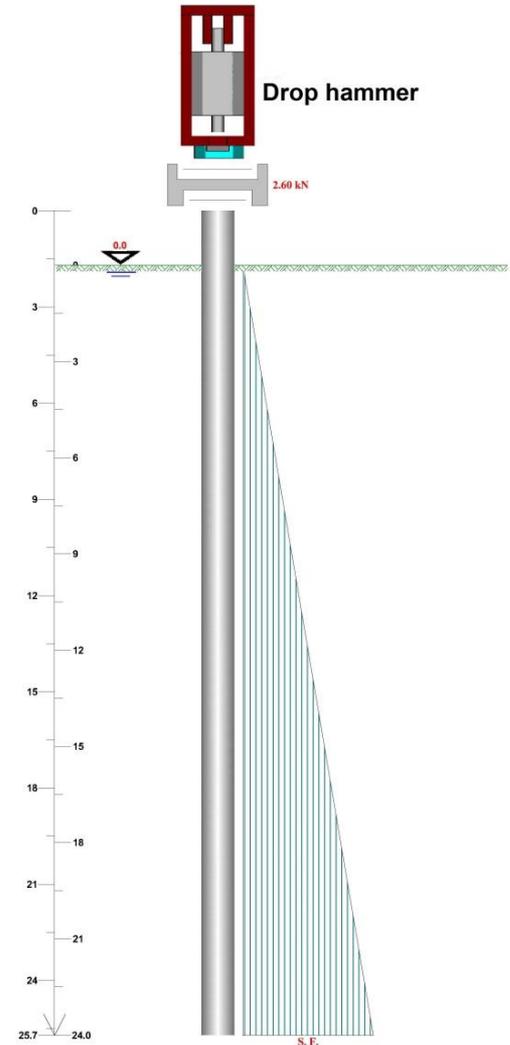
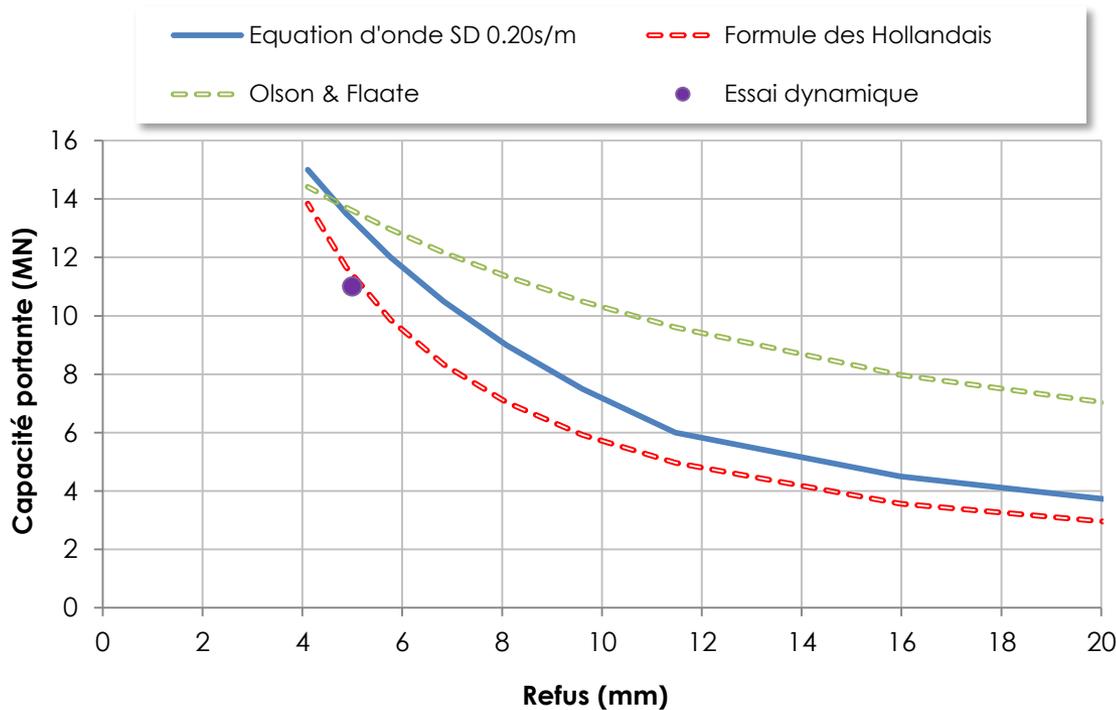
$$P_u = \frac{e_h E_h}{s + \sqrt{\frac{e_h E_h L}{2AE}}} \text{ (Formule des Danois, Olson \& Flaate 1967)}$$

- $E_h$  : Energie nominale du marteau (mgh pour un mouton simple)
- $e_h$  : Rendement du marteau       $s_1$  : raccourcissement du pieu
- $s$  : refus, la moyenne de l'enfoncement par coup sous 10 coups
- $W_p$  : Poids du pieu       $W_r$  : poids du mouton       $L$  : longueur du pieu

→ Ne prennent pas en compte la raideur du pieu !

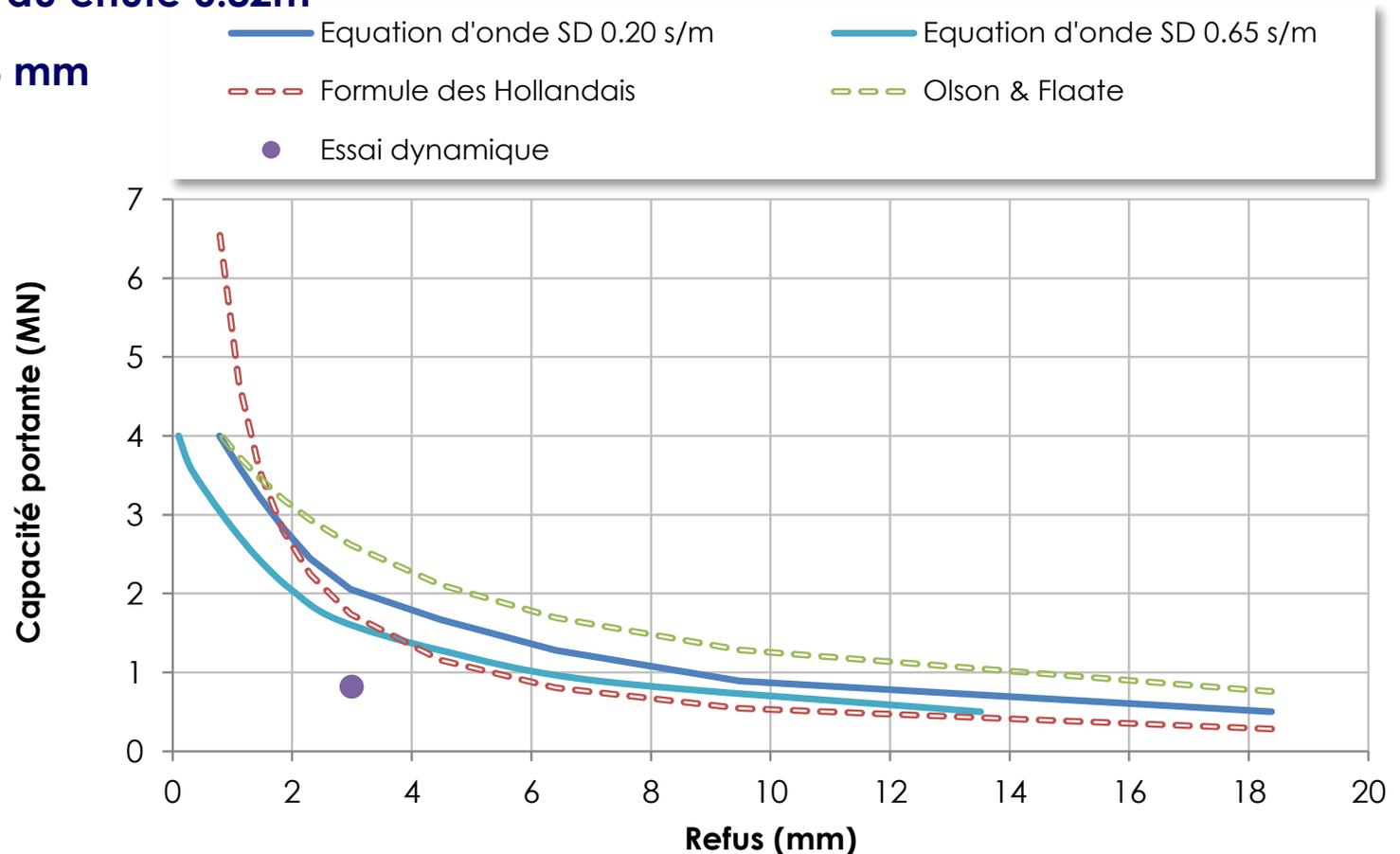
# Exemple (Essais dynamiques, Marseille)

- **Pieu béton : 25.7 m de long, 0.94m de diamètre**
  - ➔ Poids du mouton: 157kN, Rendement global: 90%
  - ➔ Hauteur du chute 1.5m
  - ➔ Refus ~5 mm



# Bourget du Lac

- **Pieu béton : 12.3 m de long, 0.52m de diamètre**
  - Poids du mouton: 29kN, Rendement global: 69%
  - Hauteur du chute 0.82m
  - Refus ~3 mm



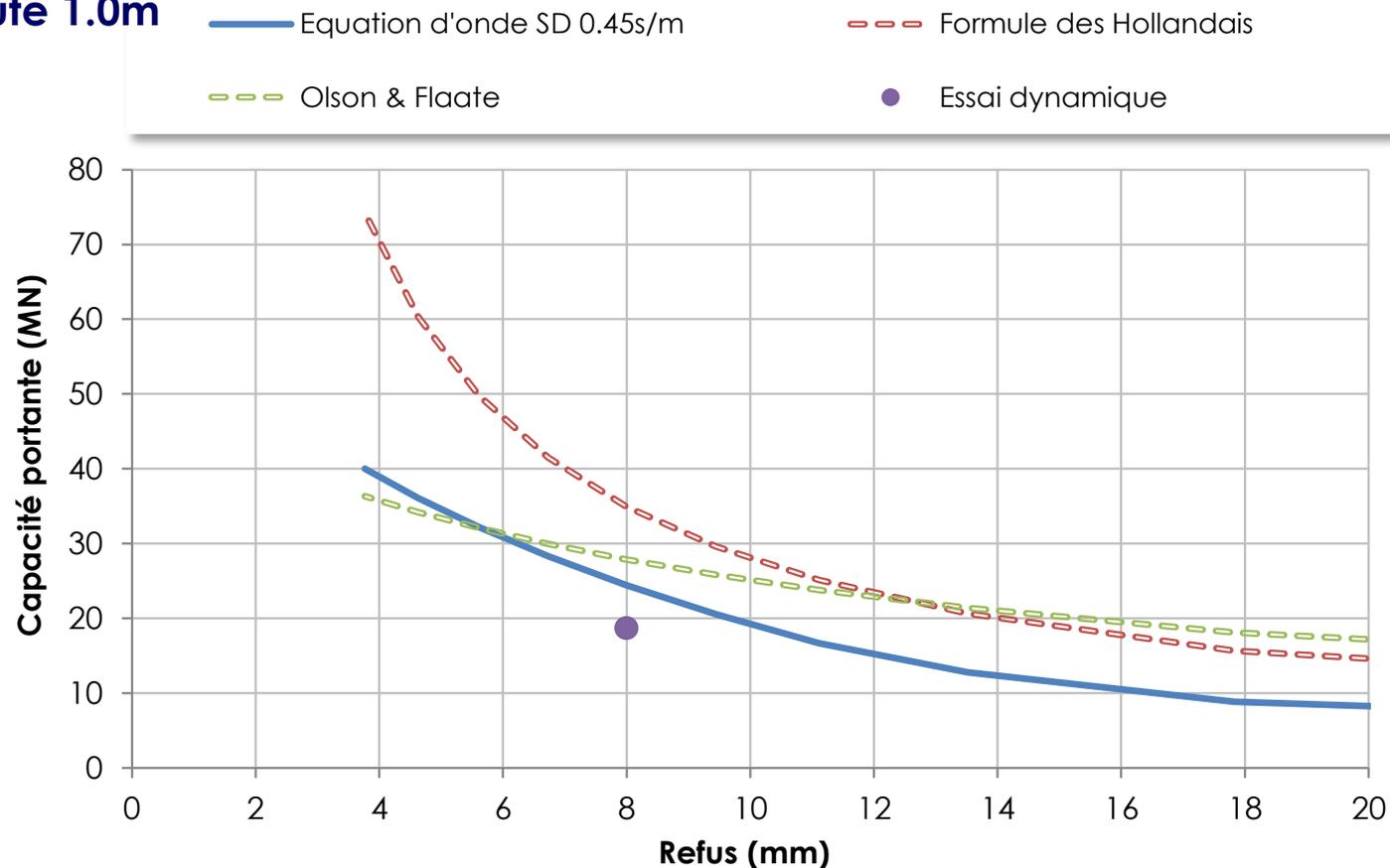
# Parc d'Eolienne en Mer – Mer du Nord

- **Pieu métallique : 33 m de long, 2.48m de diamètre, 55mm d'épaisseur**

→ IHC S1200, masse frappante: 1208kN

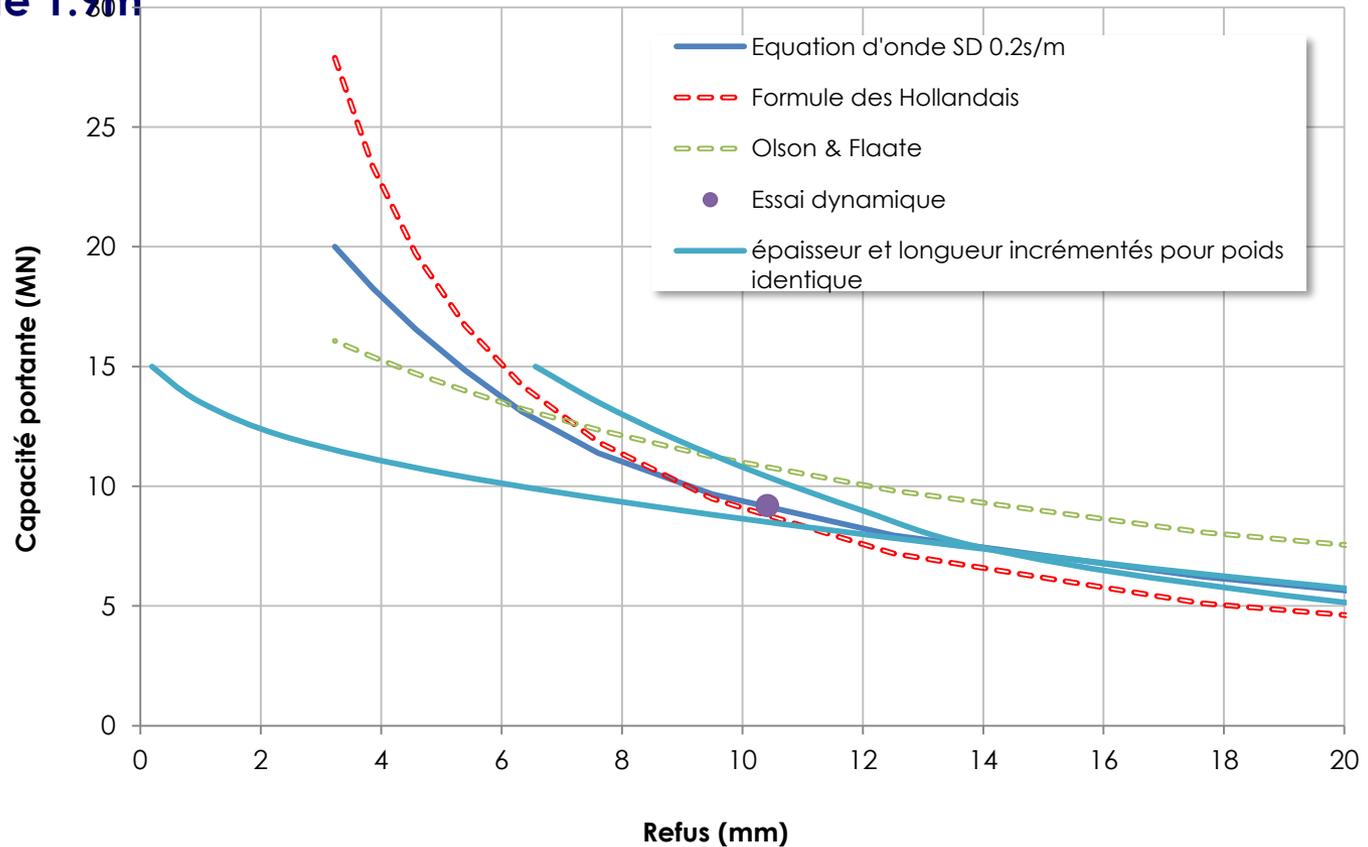
→ Hauteur du chute 1.0m

→ Refus ~8 mm



# Jetée en Mer : partie onshore

- Pieu métallique : 27.5 m de long, 1.54m de diamètre, 25mm d'épaisseur
  - Menck 270T, masse frappante: 159kN
  - Hauteur du chute 1.9m
  - Refus ~10.5 mm



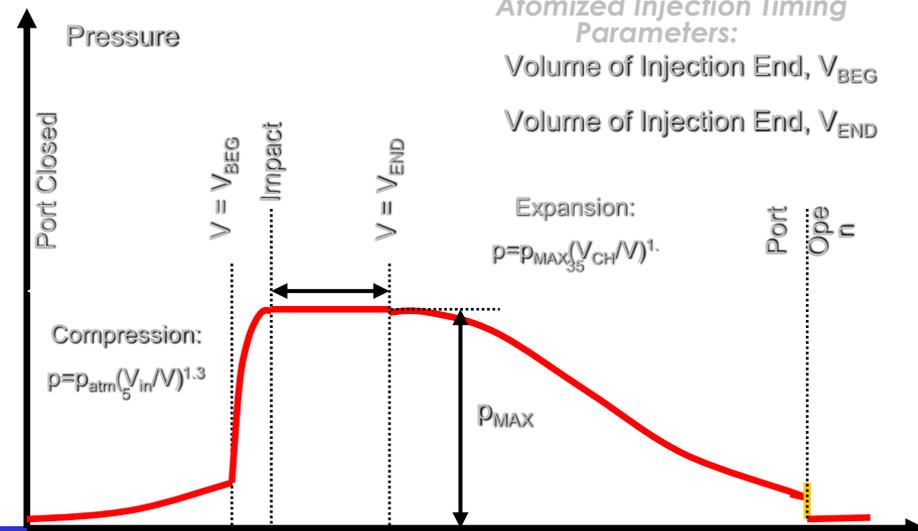
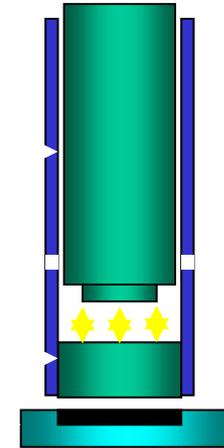
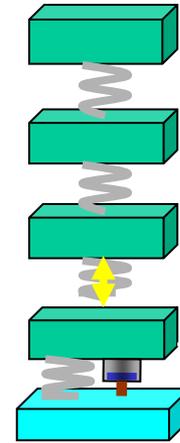
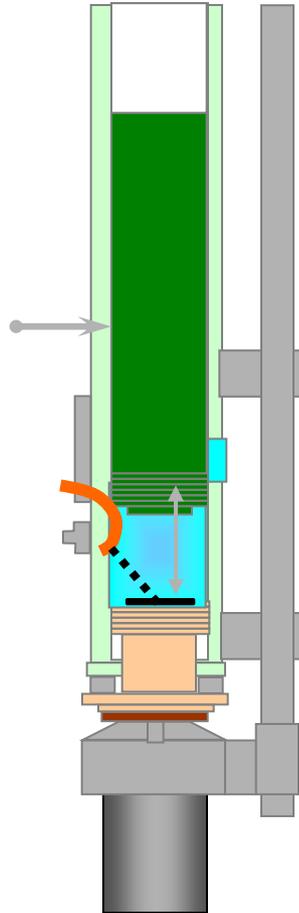
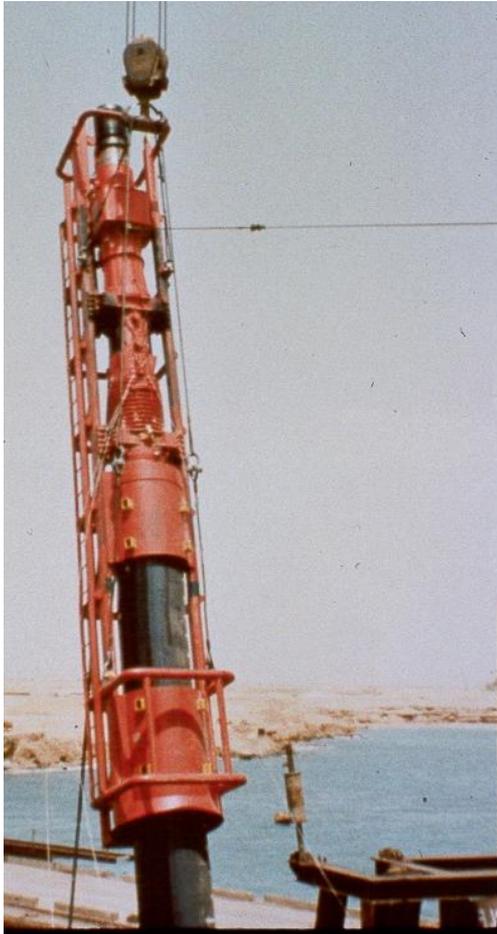
# Limites et applicabilité des formules de battage

- On constate que la formule des hollandais fonctionne bien pour des pieux de dimension standard en battage facile.
- **En battage difficile (refus < 10 mm), ou pour des pieux fins, la formule des hollandais affiche une erreur de l'ordre de 100%.**
- *Cummings 1940, Dynamic Pile Driving Formulas:*  
« Peu, voire aucune, des formules existantes sont théoriquement valide »
- *Terzaghi 1942, Proceeding ASCE:*  
« Les études comparatives démontrent que les différentes formulations ne sont généralement pas valable pour des sols cohérents »
- *Factor de Sécurité préconisé 4~6*
- Les formules de battage ne sont **plus acceptées** par certaines industries (pétrolière, offshore, etc ..)

# Méthodologie de l'ingénierie de battage

- **Modélisation numérique du système marteau-pieu-sol** (logiciel GRL WEAP ou équivalent) par résolution de l'équation d'onde .
  - Le marteau: disponibles dans la base de donnée du logiciel
  - Le pieu: modélisé en un milieu continu élastique **1D**
  - L'interface sol-pieu: modèle **élasto-plastique linéaire, avec viscosité** (amortissement) proportionnelle à la vitesse et la résistance statique.

# Modélisation du marteau



Atomized Injection Timing Parameters:  
 Volume of Injection End,  $V_{BEG}$   
 Volume of Injection End,  $V_{END}$

# Modélisation du marteau

La quasi-totalité des marteaux existants a été modélisée et est disponible dans la base de donnée du logiciel.

Des marteaux de conception simple (mouton en chute libre) peuvent aisément être modélisés et ajoutés à la base de donnée.

The screenshot displays the Hammer Maintenance software interface. The main window shows a table of hammer data with columns for ID, Manufacturer, Model, Energy/Power, Ram Weight, Eq. Ma..., Type, No. Ram S..., Ram Leng..., Ram Diam..., Geom. Ma..., Eq. Rated S..., Efficiency, Model, I.B. Weight..., and I.B. Length... The table lists various hammer models from 304 to 344, including MKT, IHC, and SC series.

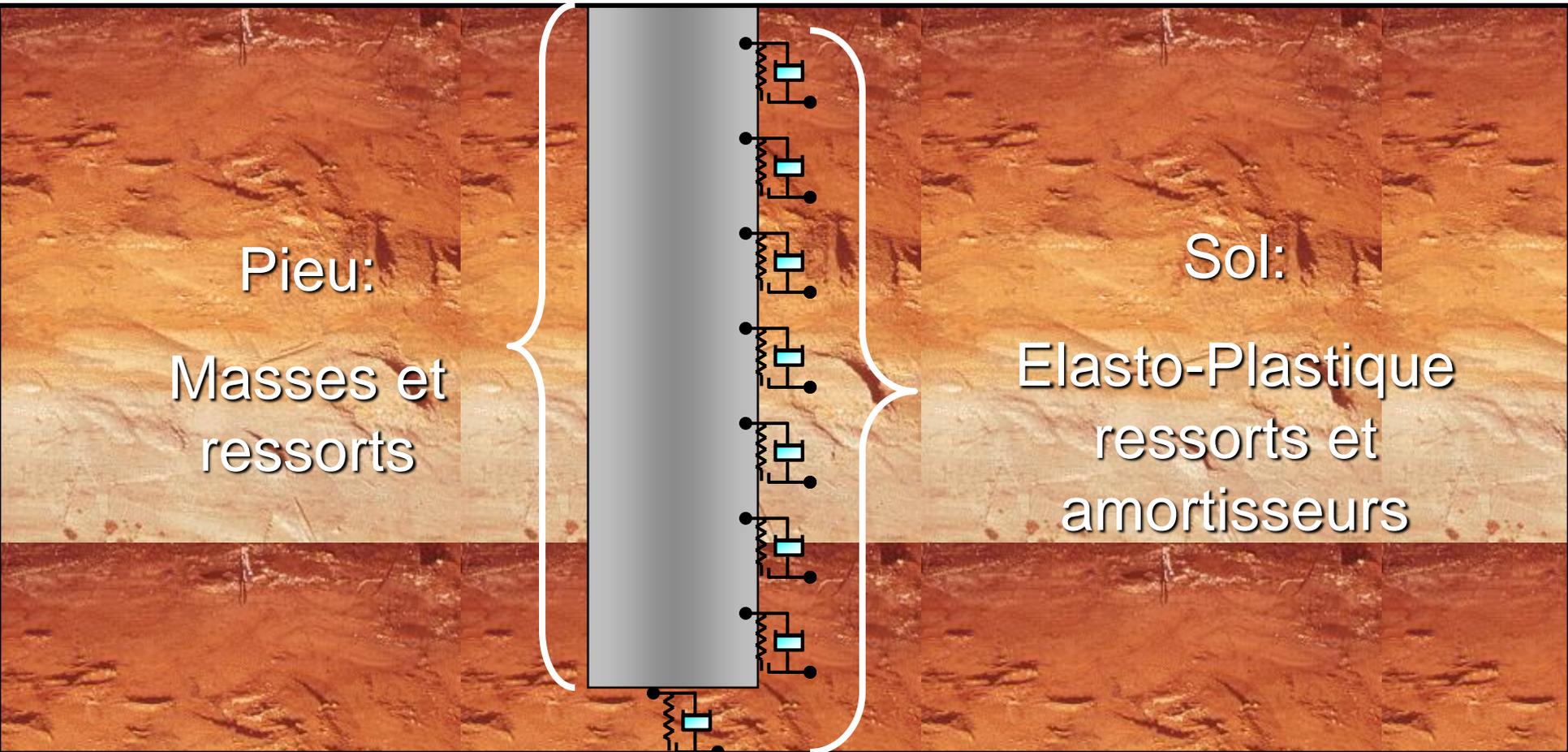
A dialog box titled "Hammer ID 322 8/12/2003" is open, showing detailed parameters for an "External Combustion Hammer | Non Uniform Ram". The dialog includes the following fields:

- Manufacturer: IHC
- Model: S-90
- Hammer Type: External Combustion
- Units: SI
- Rated Energy (KJ): 89.3871
- Ram Weight (kN): 44.233
- Stroke Equiv. Rated (m): 2.02082
- Length (mm): 6449.06
- Efficiency: 0.95
- Diameter (mm): 335.28
- Assembly C. o. R.: 0.8
- No. of Segments: 9
- Round Out (mm): 3.048
- No. Elements: 2
- Assembly Weights: Element 1 (kN) 23.8965, Element 2 (kN) 23.8965, Element 3 (kN) 0
- Assembly Stiffness: Element 1 (kN/mm) 4705.7, Element 2 (kN/mm) 4705.7, Element 3 (kN/mm) 0

The dialog box has buttons for OK, Cancel, Apply, and Help.

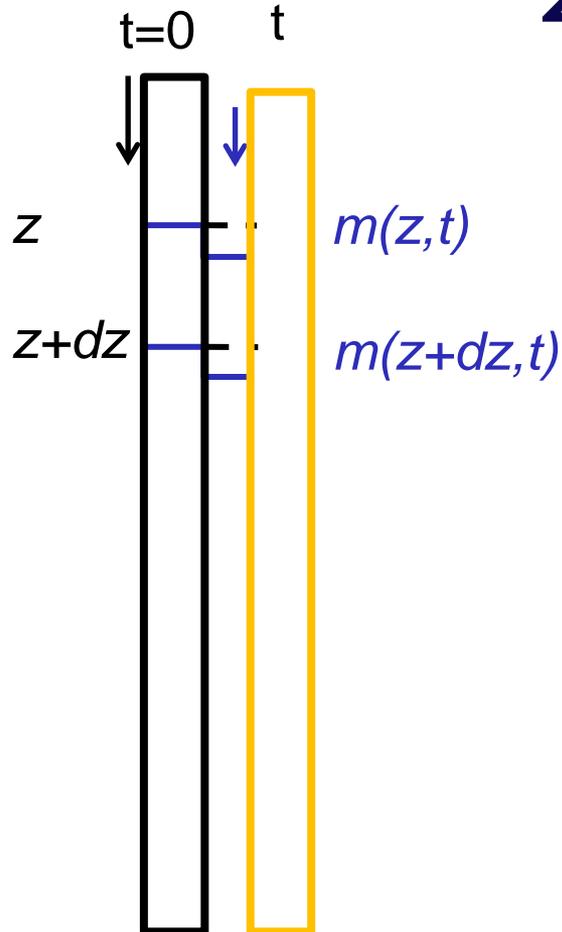
# Modélisation du pieu

Le pieu est modélisé en un milieu continu élastique 1D.



# Equations d'onde (1D) dans le pieu

## 2<sup>e</sup> loi de Newton ( $F=ma$ )



**Poids de la section**

$$\rho \times dz$$

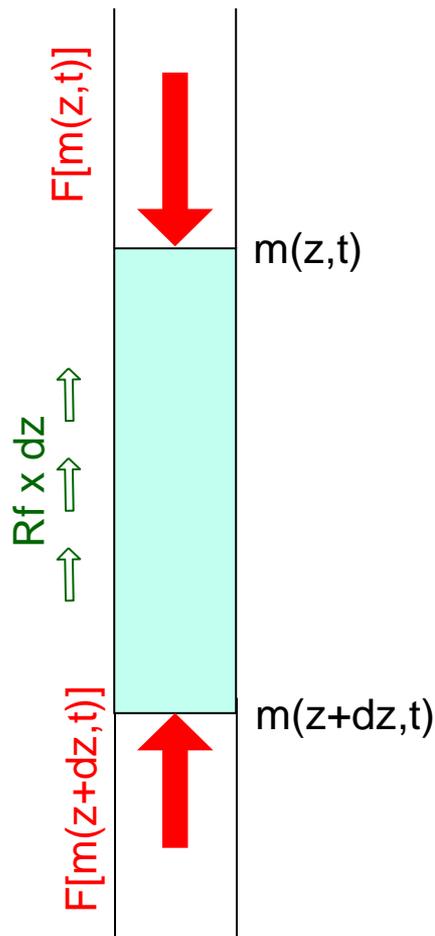
**Acceleration**

$$a(z,t) = \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial t^2}$$

**Force**

$$F = ma = \rho \times A \times dz \times \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial t^2}$$

# Equation d'onde (1D): équilibre des forces



$$F[m(z,t)] - F[m(z+dz,t)] - Rf \times dz = \sum_{m(z+dz,t)}^{m(z,t)} \text{forces}$$

$$\frac{\partial F[m(z,t)]}{\partial z} \times dz$$

Loi de Hooke

2<sup>nd</sup> loi de Newton

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

Qui conduit à :

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

# Equation d'onde (1D) dans le pieu résolution

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

1. Une solution particulière
2. l'ensemble des solutions de l'équation sans le 2<sup>nd</sup> membre

$$\frac{E}{\rho} \times \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial t^2} = 0$$

# Equation d'onde (1D) dans le pieu résolution

$$\frac{E}{\rho} \times \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial t^2} = 0$$

Solution générale de l'équation sans le second membre:

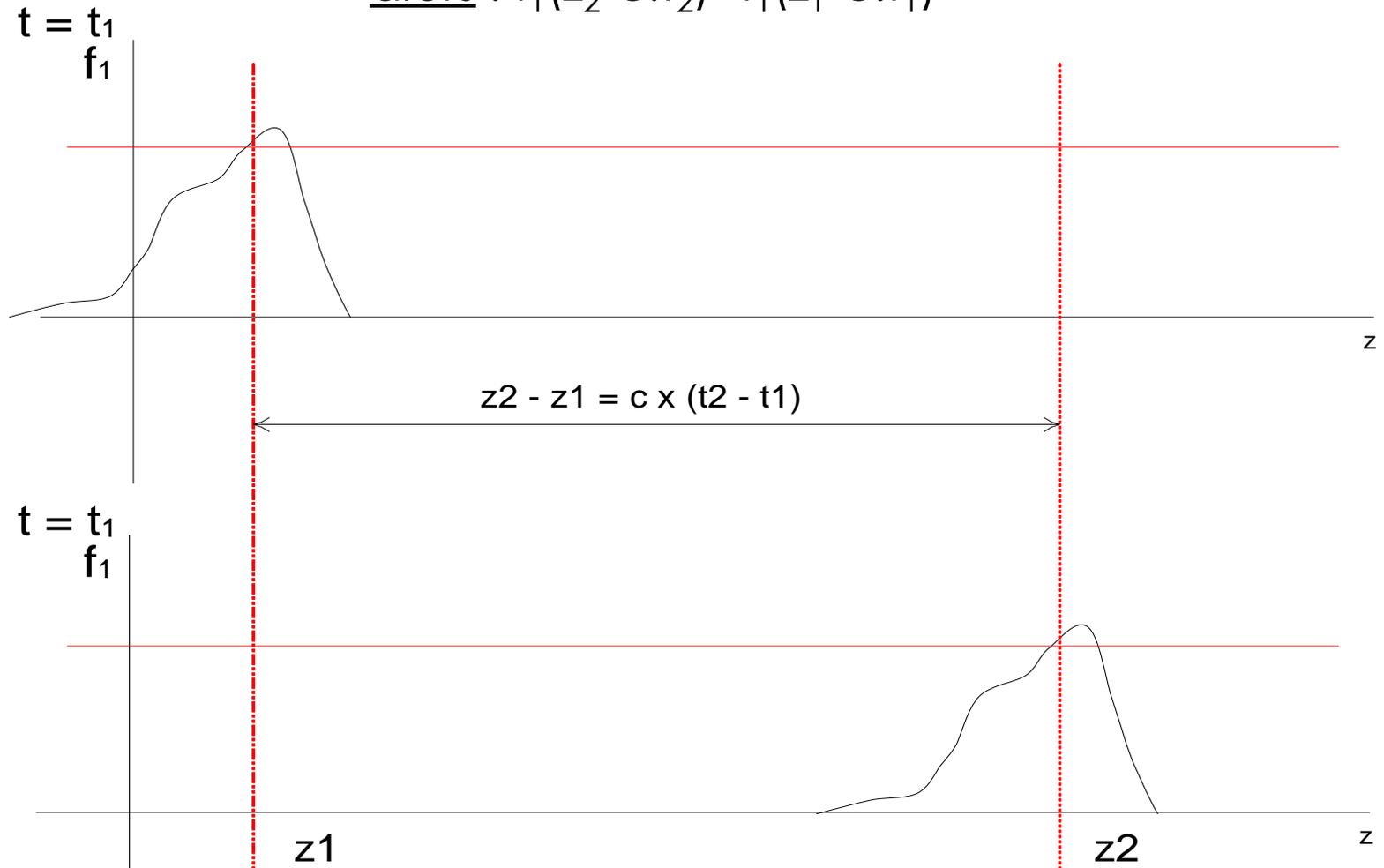
$$m(z,t) = f_1(z-ct) + f_2(z+ct)$$

**où**  $c^2 = E/\rho$

$f_1$  et  $f_2$  sont des fonctions continues dérivables.

Une fonction prenant la forme  $f(z-ct)$  est appelée équation d'onde.

si  $z_1$  et  $z_2$  sont tels que  
 $z_2 - z_1 = c \cdot (t_2 - t_1) \Leftrightarrow z_2 - c \cdot t_2 = z_1 - c \cdot t_1$   
 alors :  $f_1(z_2 - c \cdot t_2) = f_1(z_1 - c \cdot t_1)$



# Equation d'onde (1D) dans le pieu résolution

$$\frac{E}{\rho} \times \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 m(z,t)}{\partial t^2} = 0$$

Solution générale :  $m(z,t) = f_1(z-ct) + f_2(z+ct)$

où  $c^2 = E/\rho$ ;

$f_1$  et  $f_2$  sont des fonctions continues et dérivables.

- Vitesse  $V = \left( \frac{\partial m}{\partial t} \right) = -cf_1'(z-ct) + cf_2'(z+ct)$

- Force  $F = EA \frac{\partial m(z,t)}{\partial z} = EA(f_1'(z-ct) + f_2'(z+ct))$

$$F/EA = f_1' + f_2'$$

$$V/c = f_2' - f_1'$$

$Z=AE/c$  Impédance

$$EA f_2' = \frac{1}{2} (F-ZV) \text{ onde montante}$$

$$EA f_1' = \frac{1}{2} (F+ZV) \text{ onde descendante}$$

# Equation d'onde (1D) dans le pieu résolution

$$F/EA = f'_1 + f'_2$$

$$V/c = f'_2 - f'_1$$

$$Z = AE/c \text{ Impédance}$$

$$F_{\uparrow} = EA f'_2 = \frac{1}{2} (F - ZV) \text{ onde montante}$$

$$F_{\downarrow} = EA f'_1 = \frac{1}{2} (F + ZV) \text{ onde descendante}$$

$$F_{\uparrow} + F_{\downarrow} = F$$

➤  $F_{\uparrow} = 0 \rightarrow F = ZV$

➤ En pointe:

❖ Pointe libre,  $F=0 \rightarrow F_{\uparrow} = -F_{\downarrow}$

une onde de compression est réfléchiée en onde de tension

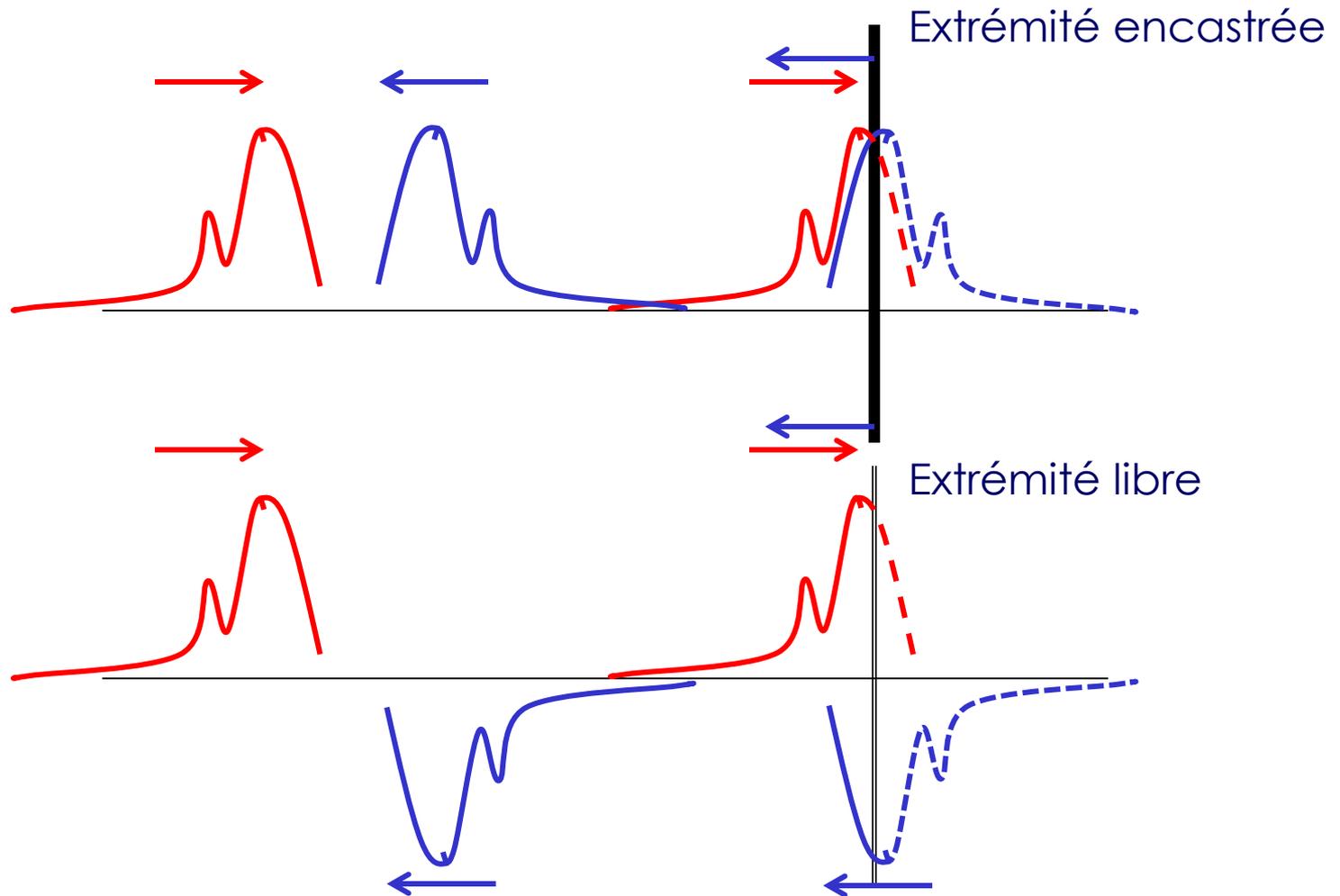
**Attention aux pieux béton !**

❖ Pointe encastrée,  $V=0 \rightarrow F_{\uparrow} = F_{\downarrow} = \frac{1}{2} F$

une onde de compression est réfléchiée en onde de compression

les ondes incidente et réfléchiée s'additionnent et **doublent la contrainte en pointe**

# Réflexion d'une onde compressive à une extrémité encastrée ou libre

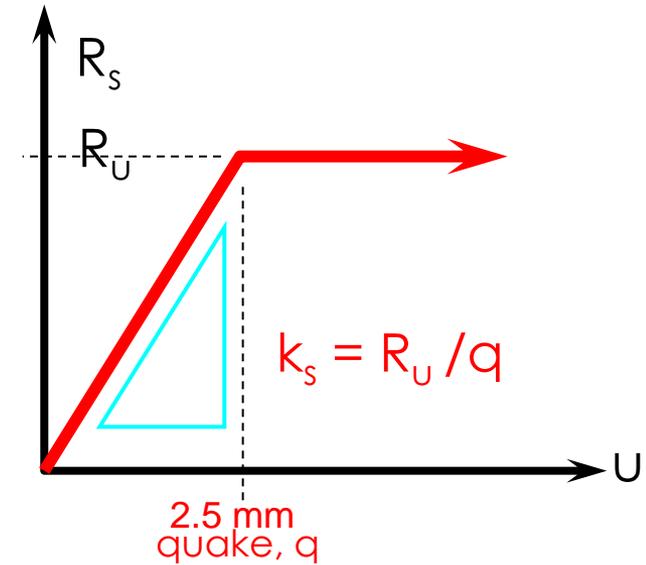
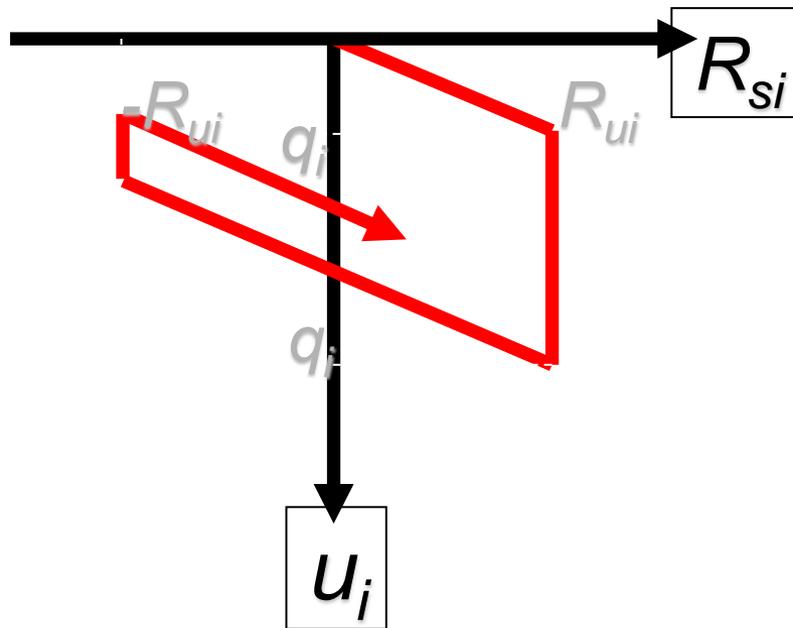


## Cas particulier de **battage** dans la roche:



# Modélisation du sol

- ❖ Comportement statique: élasto-plastique



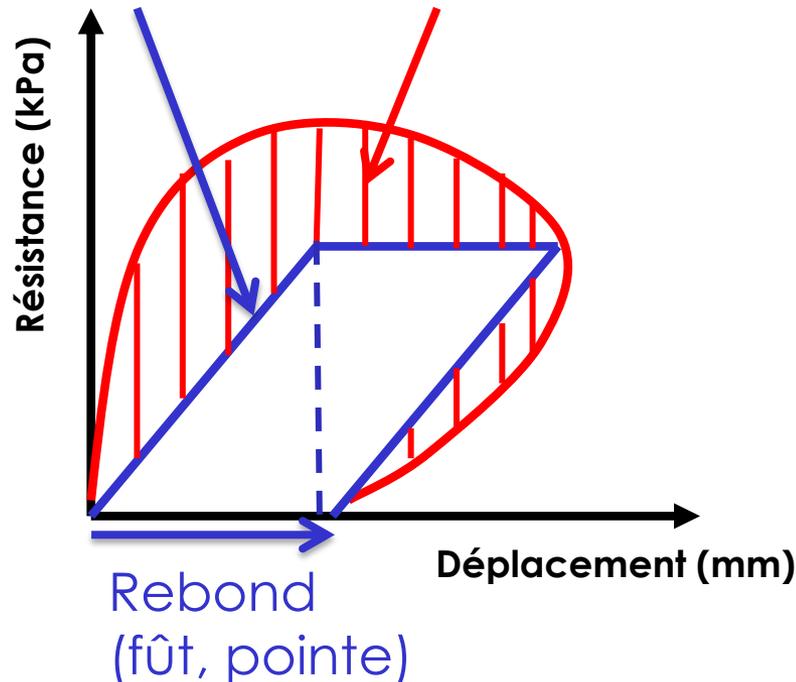
# Modélisation du sol

Smith:

$$R_{\text{totale}} = R_{\text{statique}} + D_s \cdot v \cdot R_s$$

$D_s$ : Amortissement  
(fût, pointe)

$R_{\text{statique}} + R_{\text{dynamique}}$



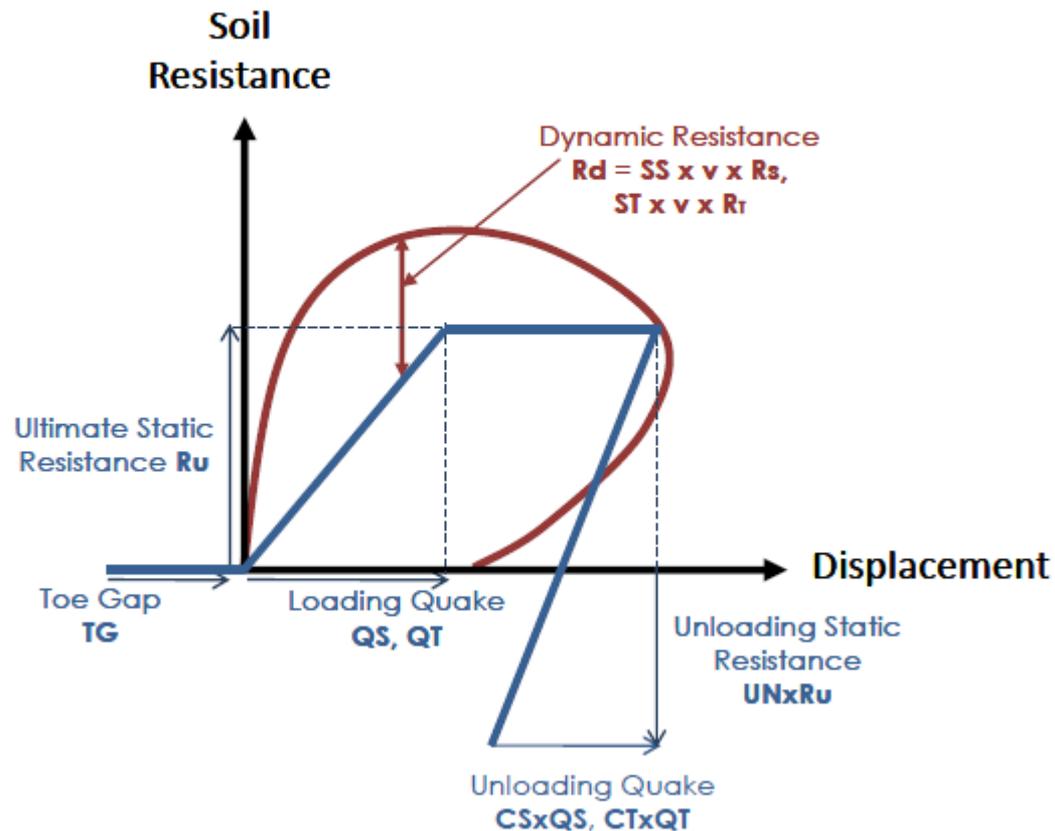
**Note:** coefficient d'amortissement  
(damping)

=

la principale inconnue  
(→ expérience du site  
ou essais préalables  
ou valeur conservative)

# Modélisation du sol

## CAPWAP SOIL MODEL



# Résistance Statique au Battage (SRD)

## *Static Resistance to Driving*

- Les propriétés mécaniques des sols sont dégradées par le battage  
→ on parle alors de SRD à distinguer de la résistance ultime du pieu

*(à ne pas confondre avec la résistance dynamique, qui dépend de la vitesse particulière du pieu).*

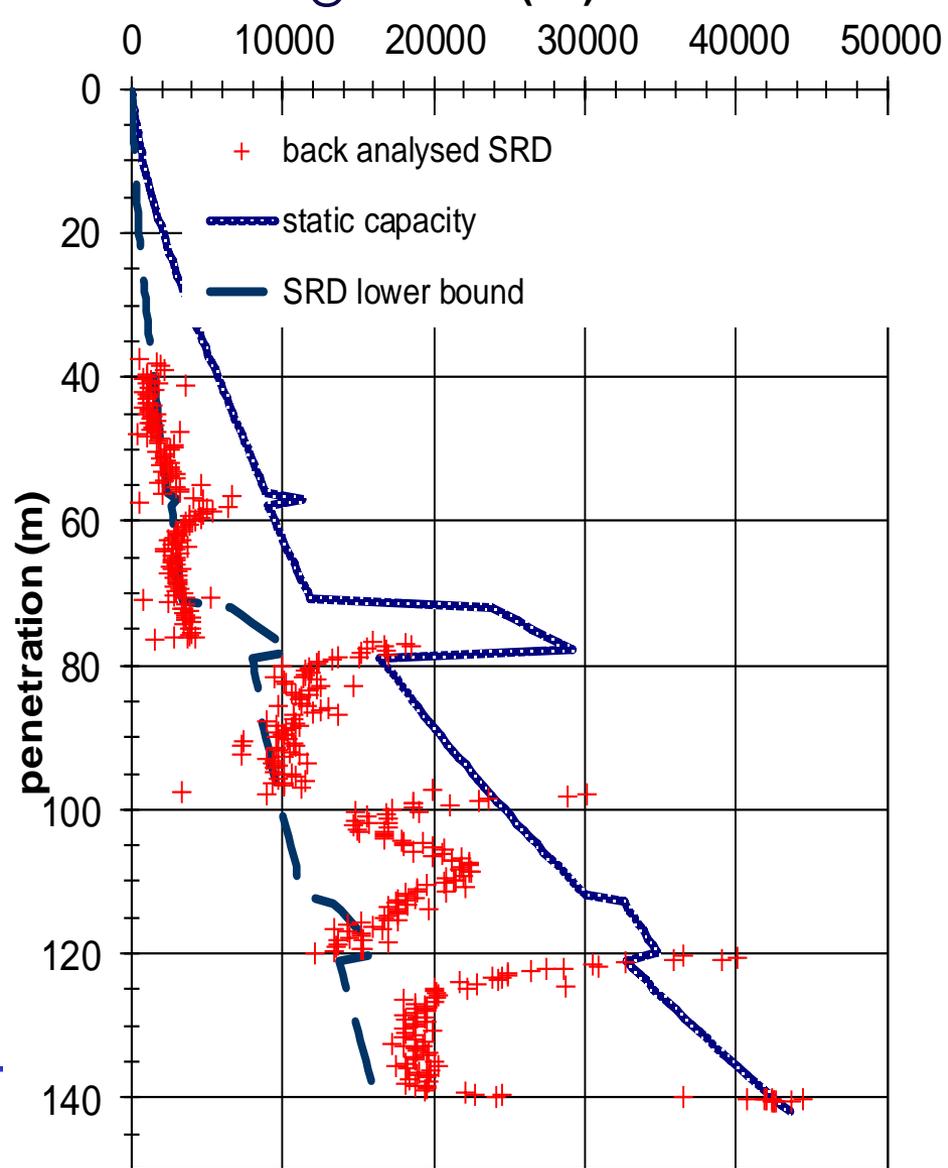
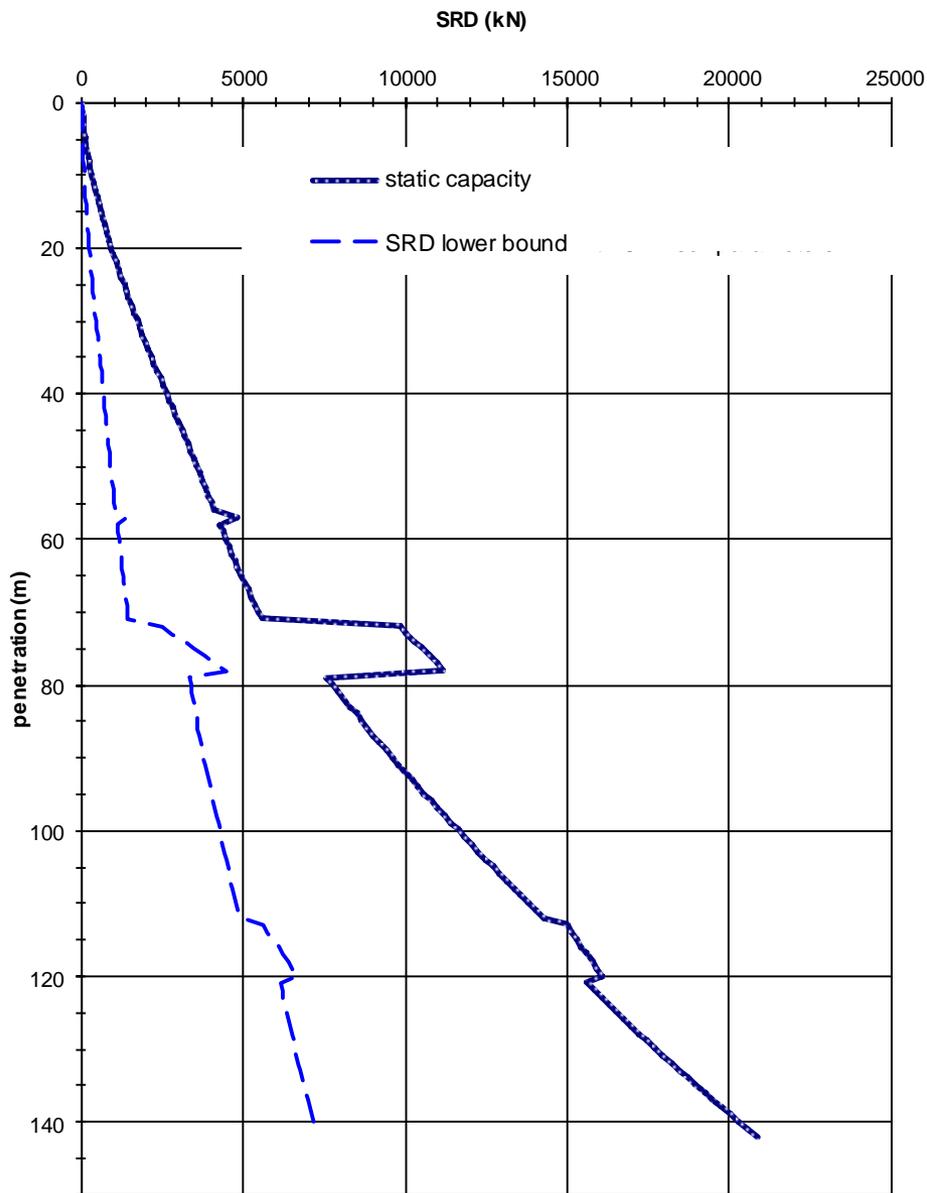
- **C'est un problème de géotechnique**, diverses méthodes sont disponibles dans la littérature, selon les types de sols rencontrés.
- En général on considère **une borne min et borne max**.
- **Cicatrisation des sols** : après le battage les propriétés mécaniques des sols atteignent progressivement leurs valeurs au long terme. Il faut plusieurs semaines à plusieurs mois.

→ marteau/pieu dimensionnés pour le battage continu ou pour un redémarrage ?

*(Ces sujets sont traités dans une autre présentation)*

# Résistance Statique au Battage (SRD)

Static Resistance to Driving SRD (kN)



# Dans la pratique: GRL WEAP (ou équivalent)

GRLWEAP 2005-2-CATHIE ASSOCIATES SA/NV - [Untitled1]

File Edit View Options Tools Window Help

SI Simple Resistance Distr Uniform Pile

Bearing Graph - prop. shaft resistance

Enter Project Title Here

Hammer Information  
Select from following list [28/08/2009-2003]: ID: 322

ID	Name	Type	Ram Wt	Energy/Power
321	IHC S-70	ECH	34.3985	69.513
322	IHC S-90	ECH	44.2330	89.387
323	IHC S-120	ECH	59.9860	121.221

Hammer parameters  
Efficiency: 0.95  
Stroke: 2.02 m  
Type: ECH, Fixed

Pile material:  Concrete  Steel  Timber

Cushion Information

	Hammer	Pile	Unit
Area	0	0	cm <sup>2</sup>
Elastic Modulus	0	0	MPa
Thickness	0	0	mm
C.O.R.	0	0	
Stiffness	0	0	kN/mm
Helmet Weight	7.829		kN

Ultimate Capacities (up to 10) kN

1	500.0	6	3000.0
2	1000.0	7	3500.0
3	1500.0	8	4000.0
4	2000.0	9	4500.0
5	2500.0	10	5000.0

Incr. 0 Action >>

Soil Parameters

Quake  
Shaft: 2.5 mm Const  
Toe: 2.5 mm

Damping  
Shaft: 0.65 s/m Const  
Toe: 0.5 s/m Smith

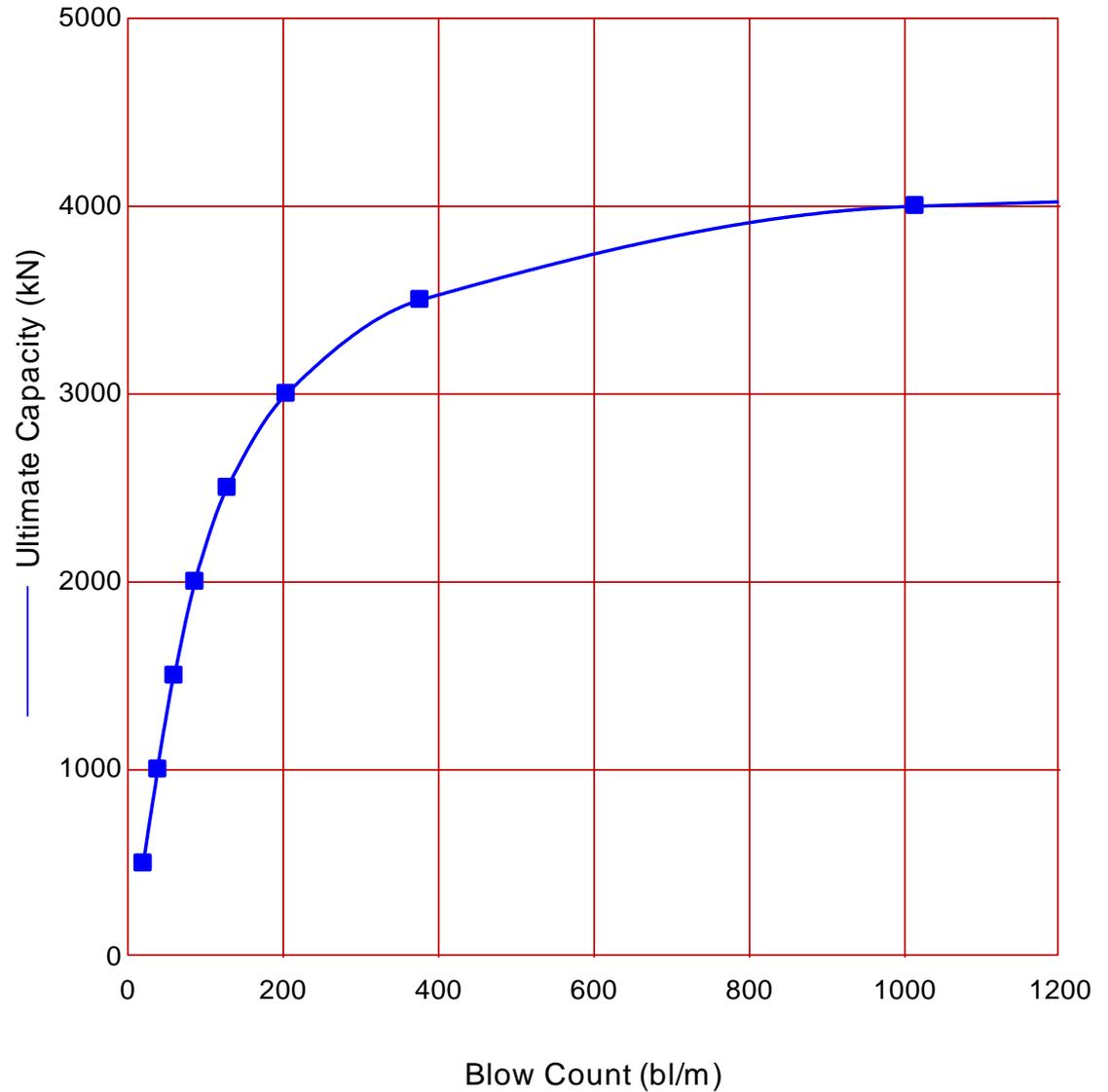
Shaft Resistance  
Percentage: 95 %  
Dist. Shape Num: 0.0

Residual Stress Analysis: No

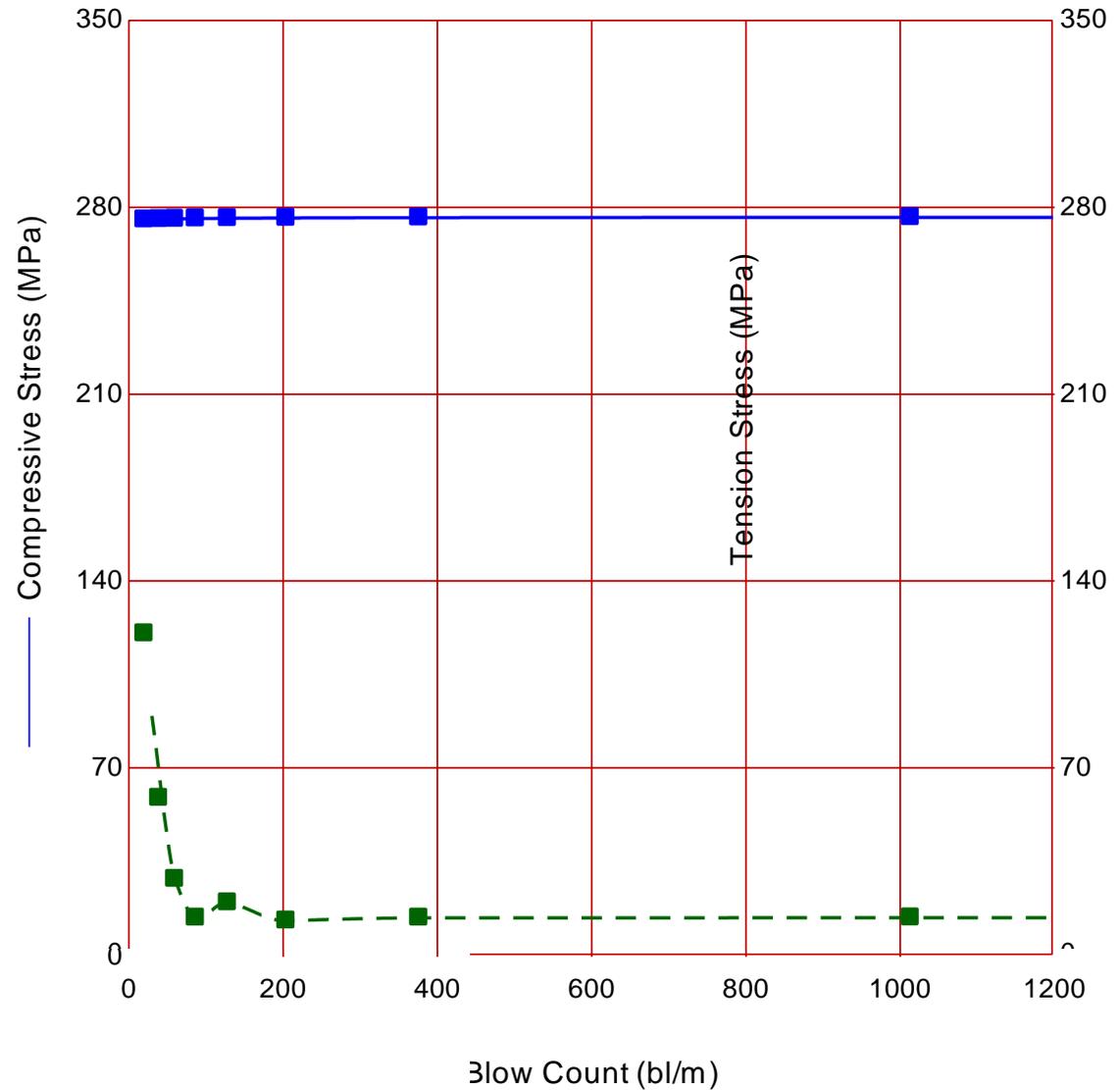
Press F1 for General Help Topics or F3 for Specific Help on Current Parameters

L'hypothèse majeure

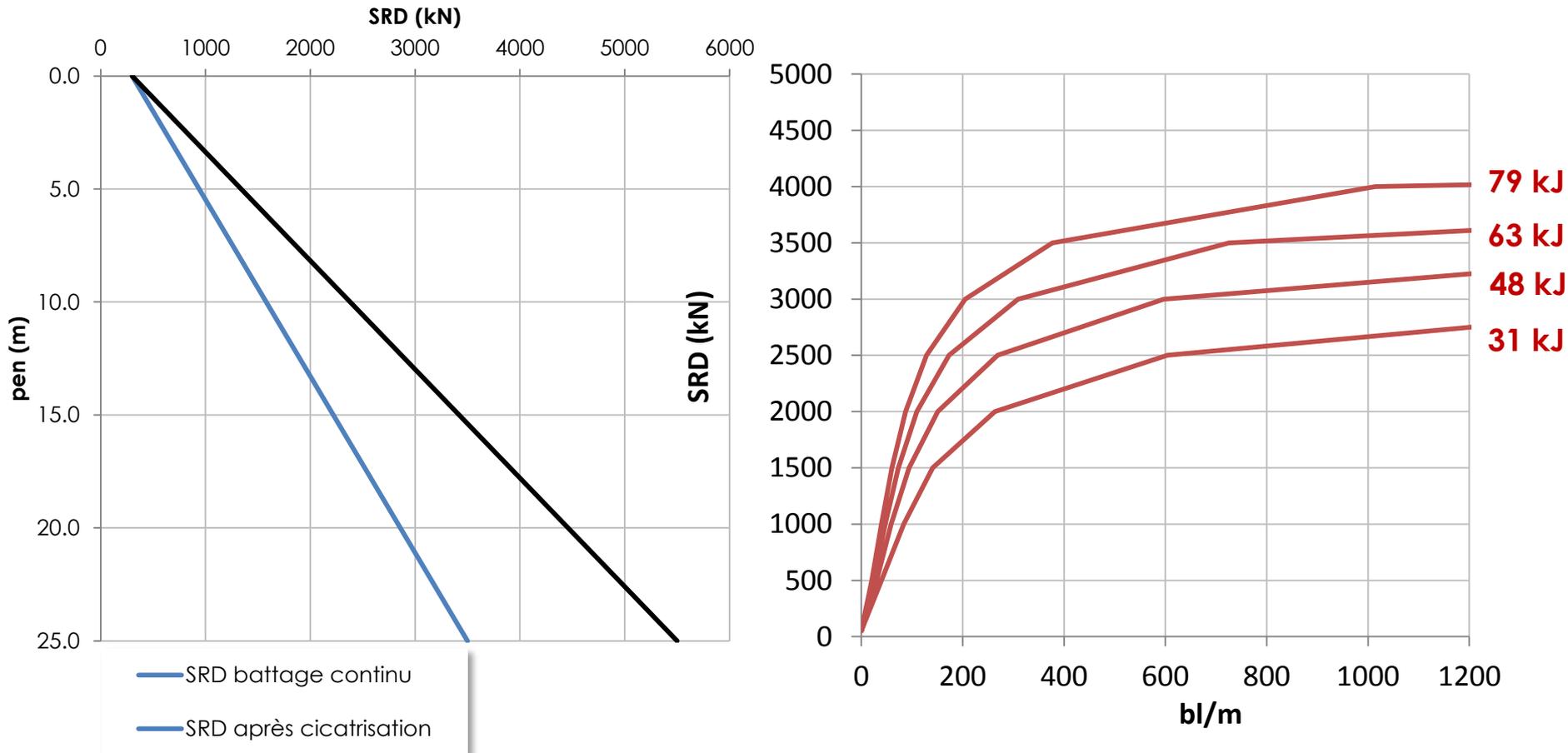
## Courbe de portance (bearing Graph)



## Contraintes max

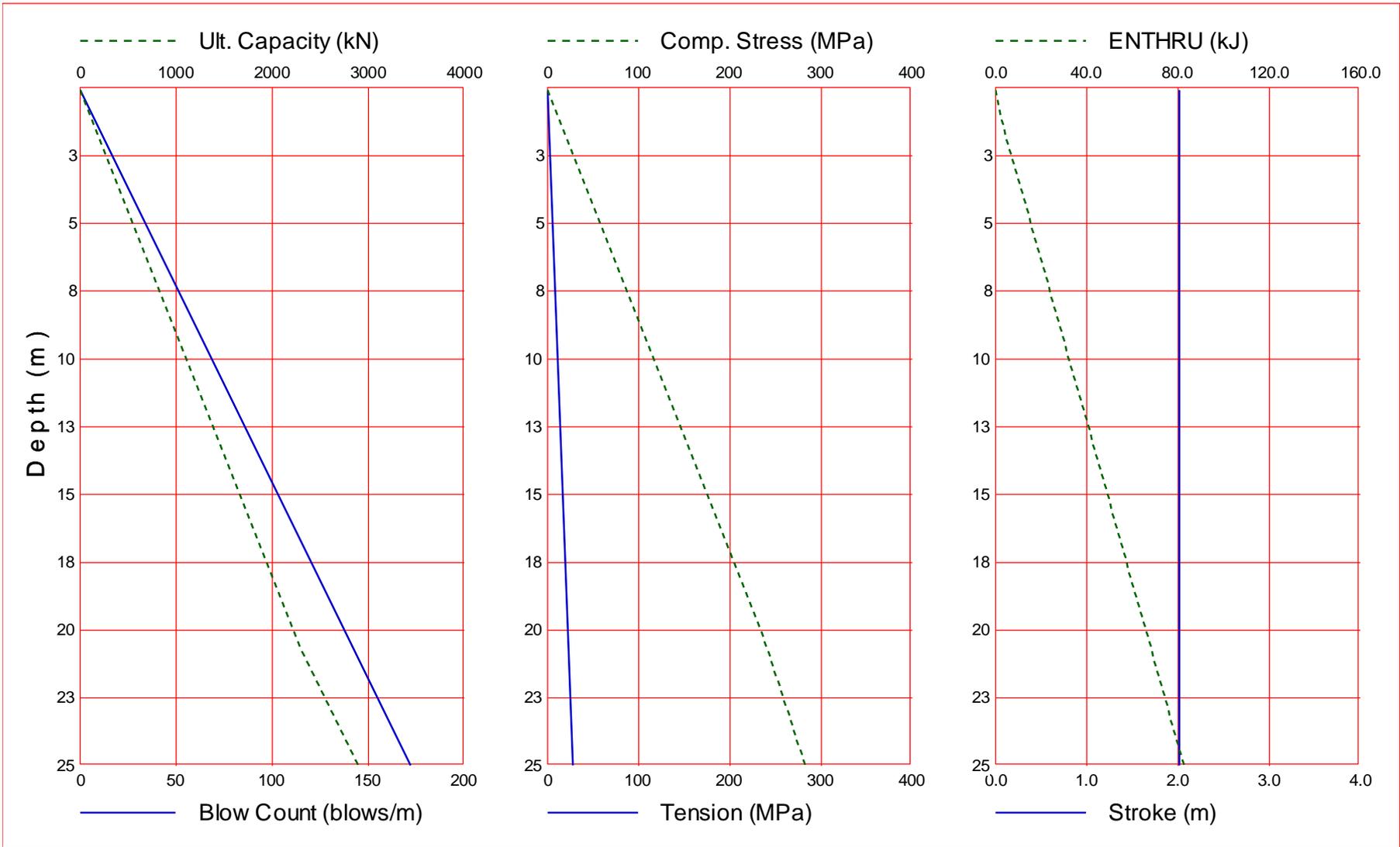


## Courbe de portance (bearing Graph)



**Note:** le modèle est peu sensible à la localisation des résistance de sol, en particulier donc à la pénétration du pieu

## Courbe de battage (*driveability*)



## Une analyse préliminaire de battage se conduit de la façon suivante:

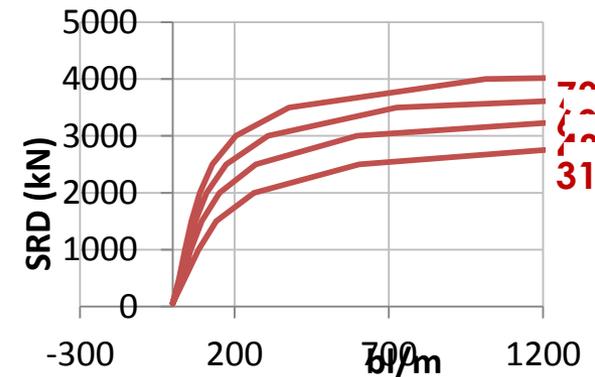
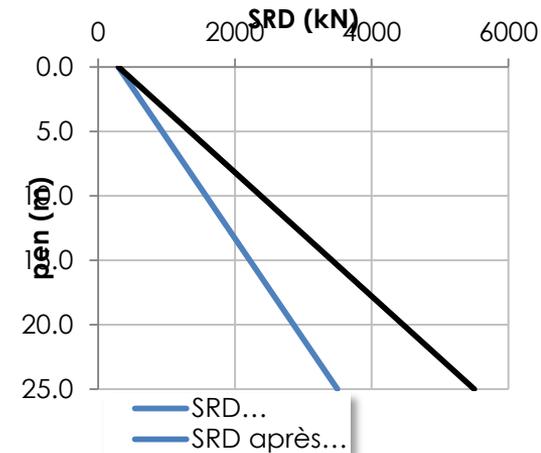
### ➤ Prédiction de la résistance du sol au battage (SRD)

en battage continu et après cicatrisation sur la base des données de sol (géotechnique)

### ➤ Modélisation numérique du système marteau sol pieu (GRL WEAP ou équivalent)

### ➤ Vérification:

- **Nombre de coups** raisonnable (<200 cp/m) en battage continu et/ou au redémarrage
- **Contraintes** acceptables (< contraintes admissibles, en compression pour l'acier, en tension pour le béton)



Si on est confortable en contraintes et nombre de coups, on est généralement en mesure d'**optimiser**:

- l'épaisseur du pieu, souvent dimensionnée au battage
- la taille du marteau



## Cas particulier de **battage dans la roche**:

- Risque majeur de dommage en pointe
- Contraintes radiales et tangentielles, non 1D axiales
- Modélisation 1D non représentative



## → **Méthode dite « par analyse paramétrique » :**

- Définit des fenêtres admissibles pour les paramètres de battage (nb coups / énergie)
- Une instrumentation du pieu réduit les risques (mesure de l'onde réfléchie par la pointe)
- Méthode empirique mais validée par l'expérience

## Cas particulier de **battage dans la roche:**

