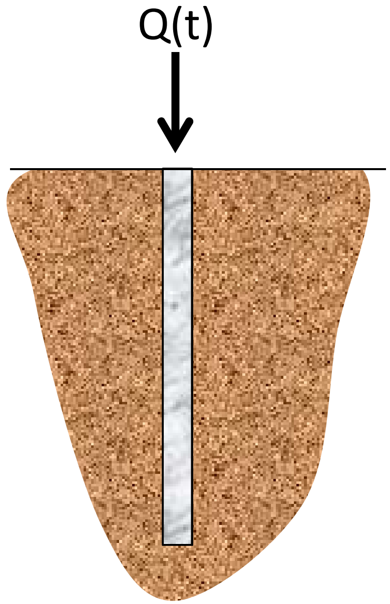
Projet National SOLCYP

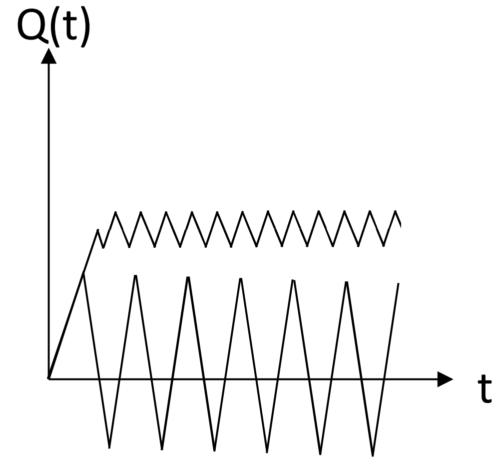
Dimensionnement des pieux sous chargements axiaux

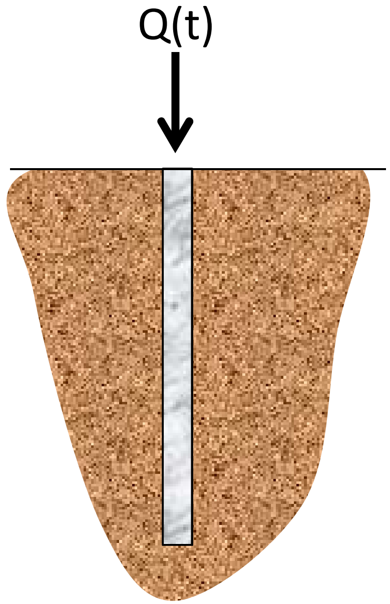
Sébastien Burlon (IFSTTAR)

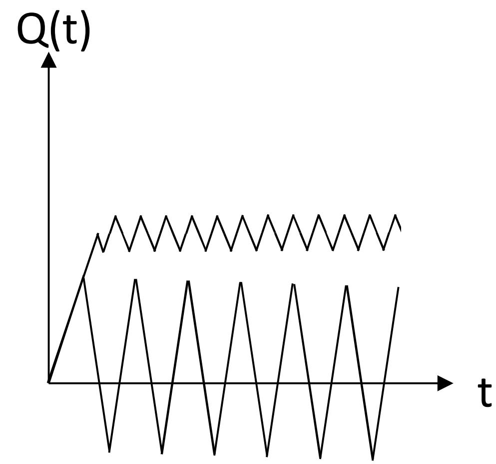
Lundi 13 mars 2017, Paris

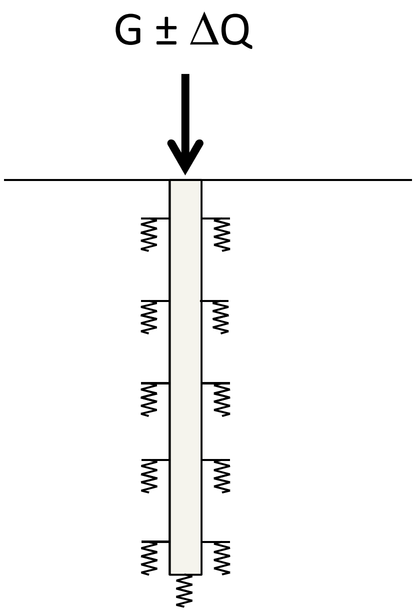
SOLCYP – Journée de restitution

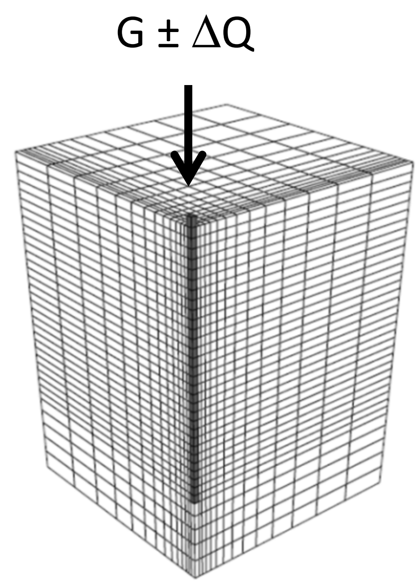

Q(t)


Q(t)
t


Q(t)


Q(t)
t


G ± ΔQ


G ± ΔQ

Calcul d’un pieu sous charge axiale cyclique

Estimation de la résistance limite du pieu lors des cycles de chargement

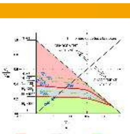
↓

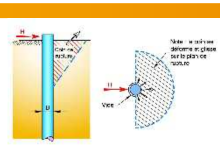
Quel est le coefficient de sécurité ? (ELU)

Prévision des déplacements du pieu

↓

Est-ce compatible avec les exigences de la structure portée ? (ELS)




Calcul d'un pieu sous charge axiale cyclique

Estimation de la résistance limite du pieu lors des cycles de chargement

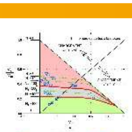
Quel est le coefficient de sécurité ? (ELU)

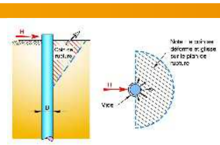
Prévision des déplacements du pieu

Est-ce compatible avec les exigences de la structure portée ? (ELS)

Deux remarques :

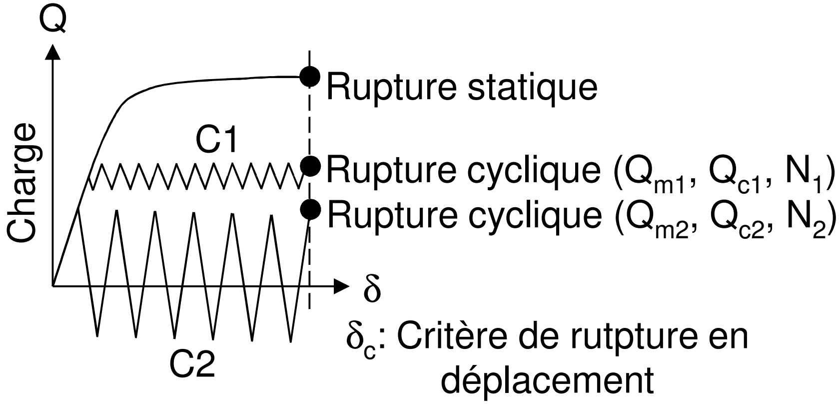
- la résistance limite cyclique n'est pas unique et dépend du chargement appliqué
- elle peut correspondre à un défaut d'équilibre ou une accumulation trop importante de déplacements

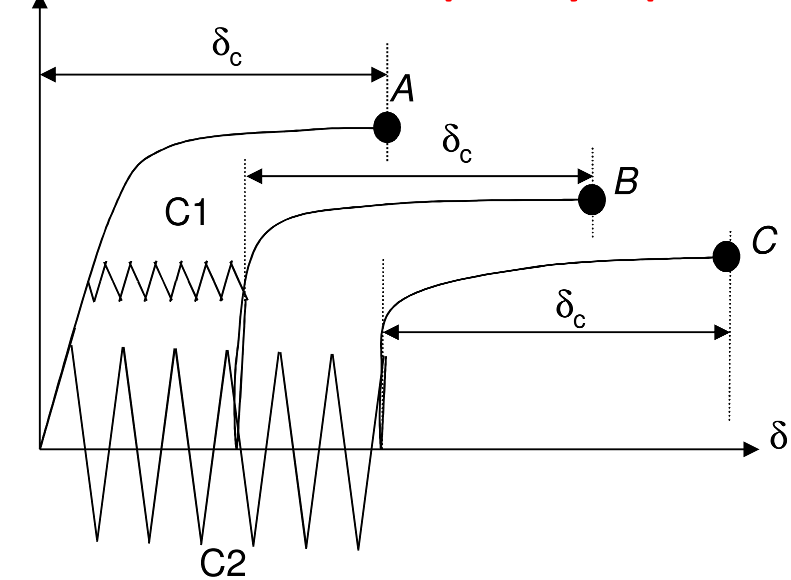



Résistance cyclique et Résistance post-cyclique

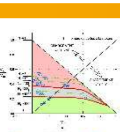
Résistance cyclique

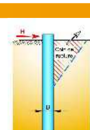
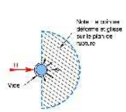


Résistance post-cyclique



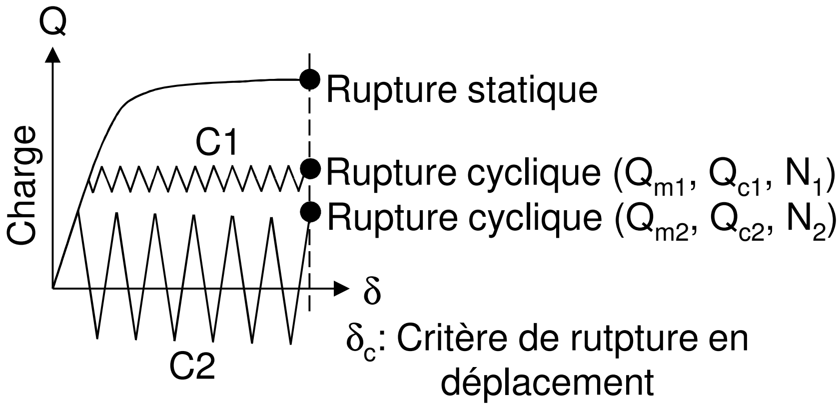
A : Rupture statique
B : Rupture post-cyclique C1
C : Rupture post-cyclique C2
δ_c: Critère de rutpture en déplacement

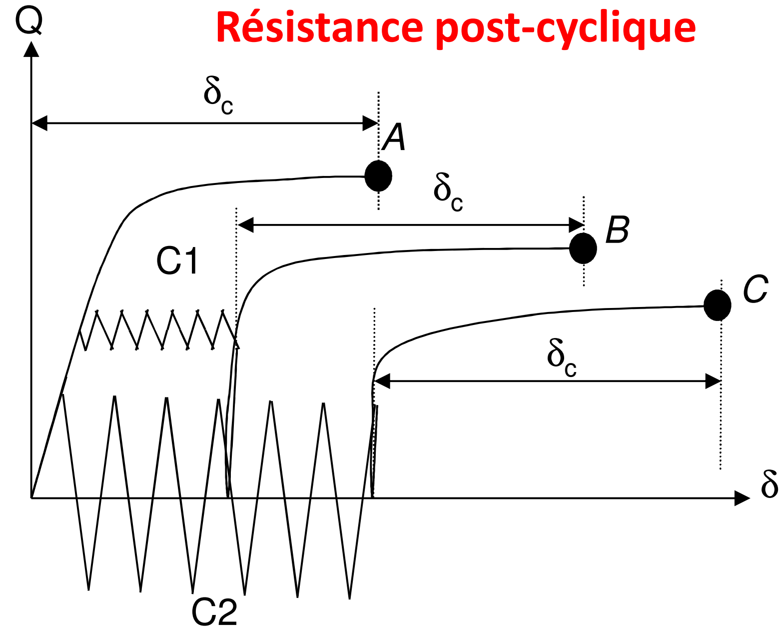




RÉSISTANCE CYCLIQUE ET RÉSISTANCE POST-CYCLIQUE

Résistance cyclique



Résistance post-cyclique

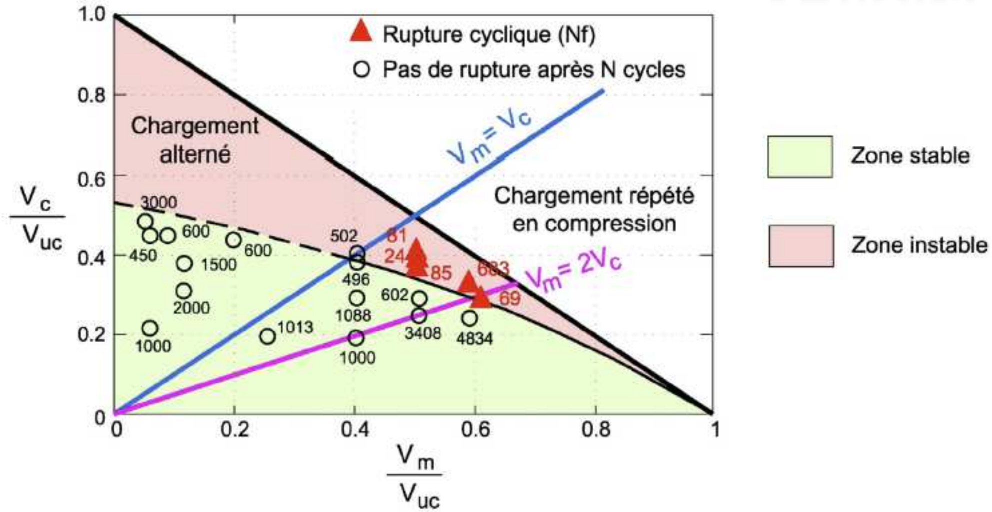


A : Rupture statique
B : Rupture post-cyclique C1
C : Rupture post-cyclique C2
δ_c: Critère de rutpture en déplacement

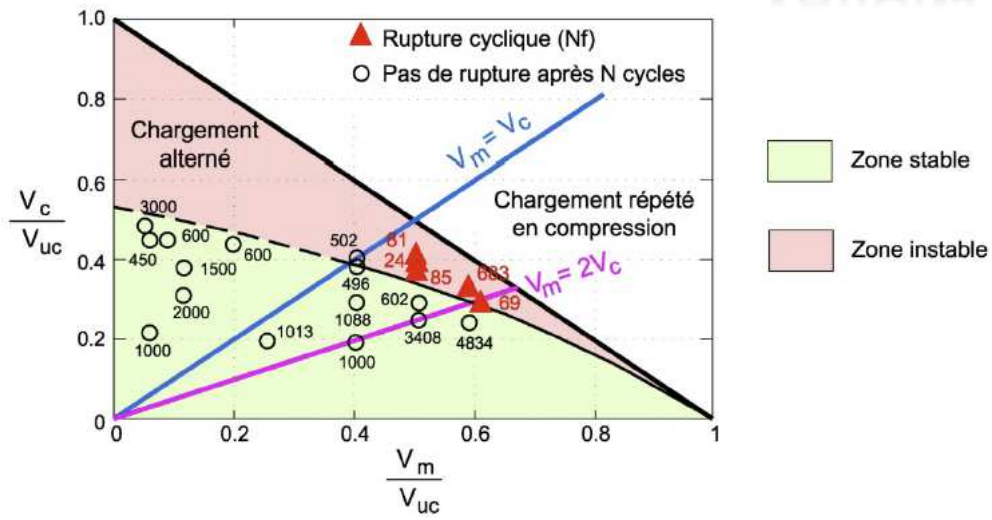
L'objectif des méthodes de calcul développées est de déterminer l'évolution de la résistance cyclique du pieu au cours d'un chargement

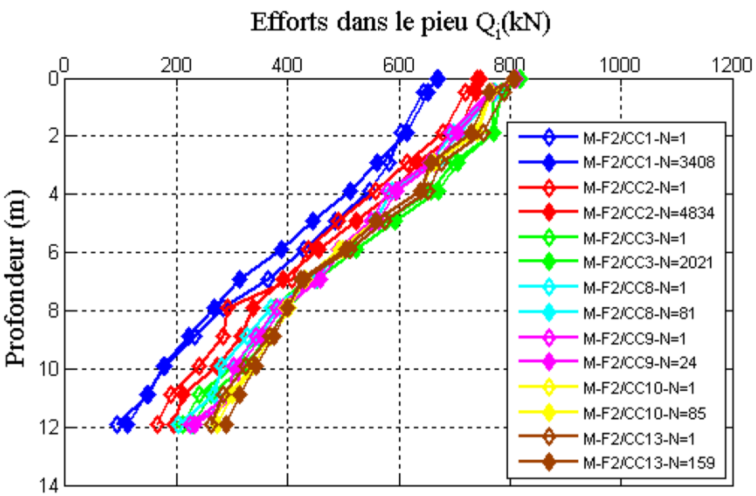
La détermination des résistances post-cycliques est actuellement hors de portée des méthodes développées

La résistance cyclique dépend du chargement

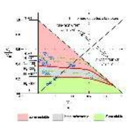


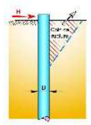
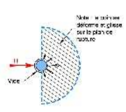
La résistance cyclique dépend du chargement



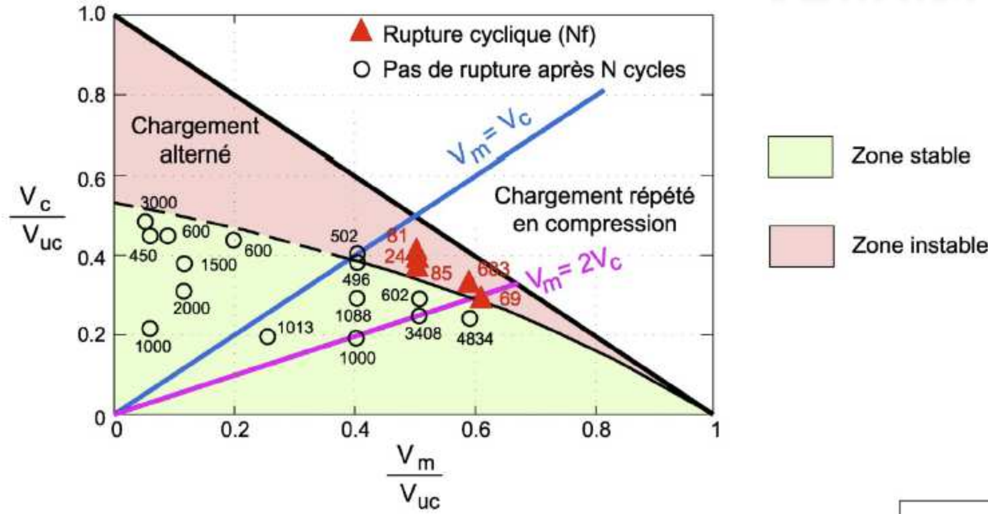


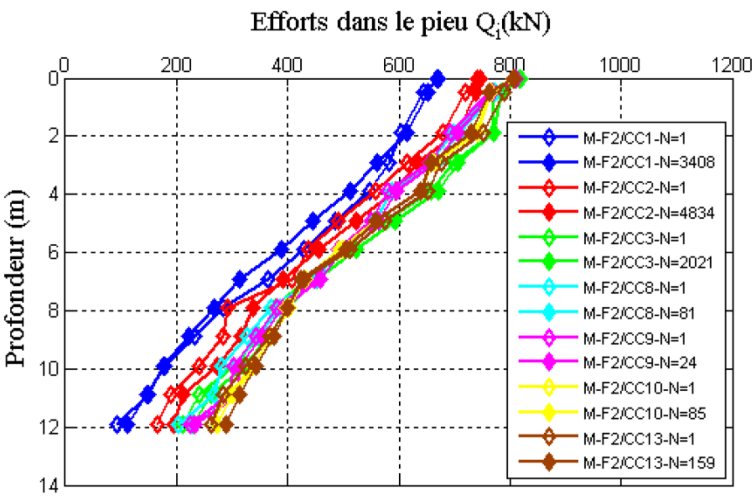
Diminution du frottement axial limite

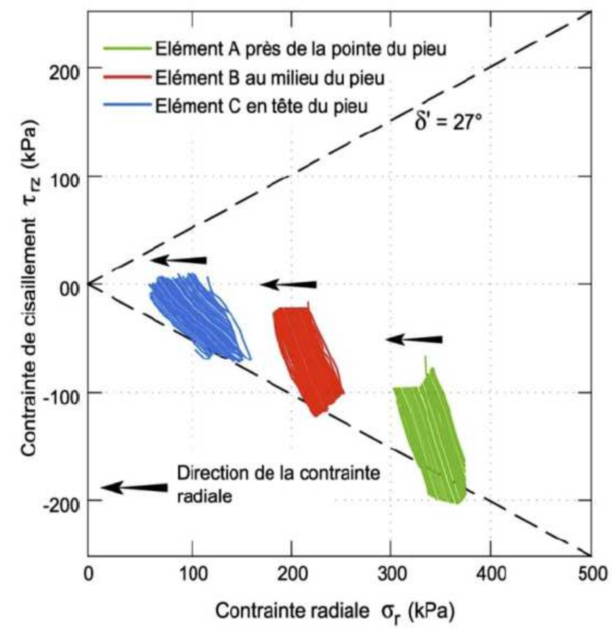

La résistance cyclique dépend du chargement

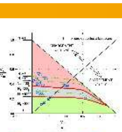


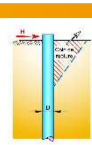
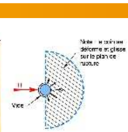


Diminution du frottement axial limite

Chute de la contrainte radiale effective




Chargement cyclique

Diminution de la contrainte radiale effective au cours des cycles

Augmentation des déplacements
Défaut d'équilibre

Problèmes non traités : variations de rigidité avec les cycles, effets de la vitesse de chargement, effets du temps, attrition des grains, etc.

Mécanismes en jeu

Sable

Argile

phénomènes de contractance

surpressions interstitielles

Chargement cyclique

Diminution de la contrainte radiale effective au cours des cycles

Augmentation des déplacements
Défaut d'équilibre

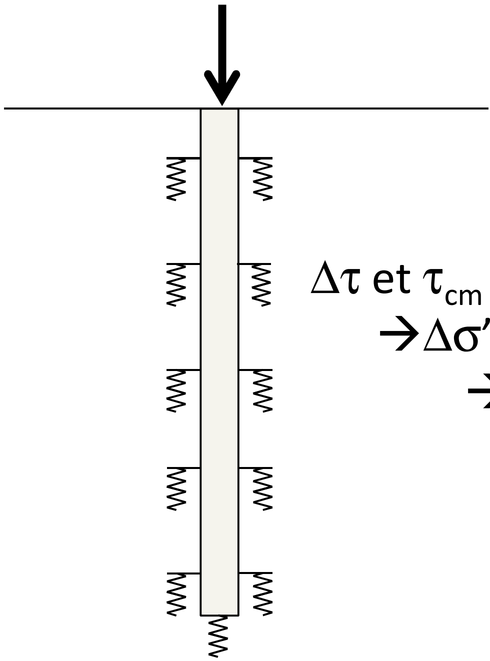
Problèmes non traités : variations de rigidité avec les cycles, effets de la vitesse de chargement, effets du temps, attrition des grains, etc.

Méthode des éléments finis ou des différences finies (SOLCYP) :
Enjeux : implémentation d'une méthode d'homogénéisation cyclique, de pseudo-fluage cyclique, de sauts de cycles, etc.

Méthode t-z enveloppe (ABC, SOLCYP) :
Enjeux : fiabilité de la méthode de dégradation

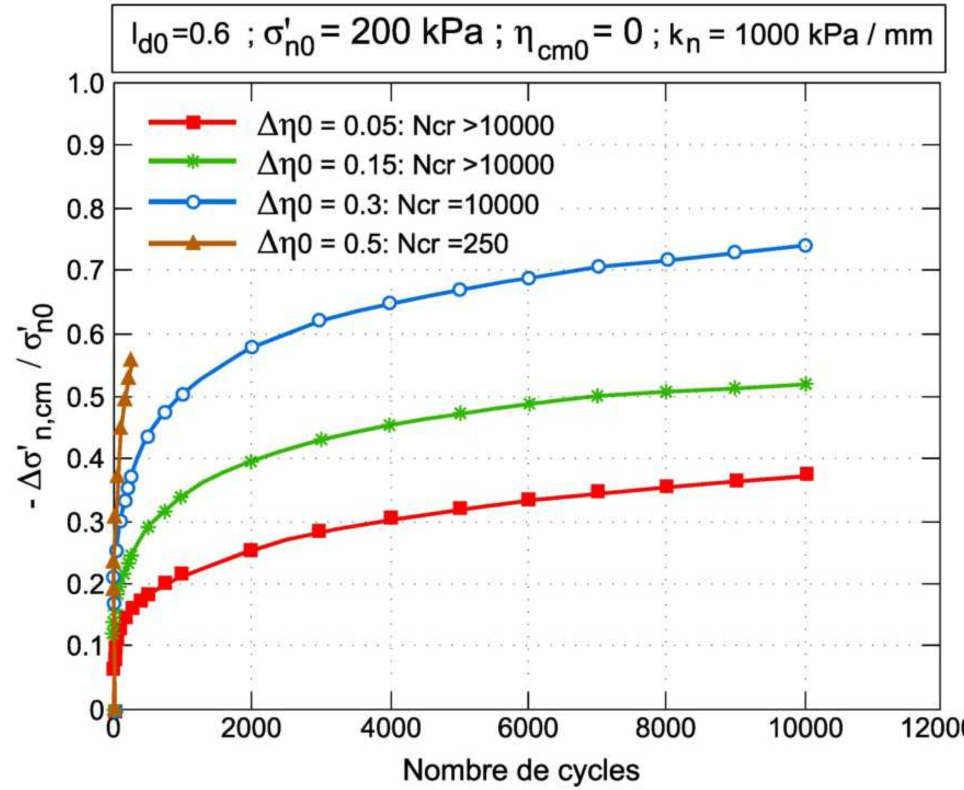
Méthode t-z cycle à cycle (SCARP, RATZ, TZC-ABC, TZC-SOLCYP) :
Enjeux : fiabilité des lois de dégradation, implémentation numérique d'une loi t-z cycle à cycle

$G \pm \Delta Q$



$\Delta\tau$ et τ_{cm}
$\rightarrow \Delta\sigma'_n$
$\rightarrow \Delta q_s = \tan\delta . \Delta\sigma'_n$

Base de données L3SR (Thèse S.Pra-ai, Master G.Pittos)

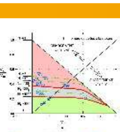


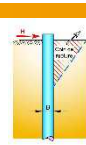
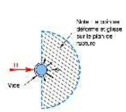
$\Delta\sigma'_n = K_n\,[u]$
avec $K_n = 2G/R$

K_n : estimation à partir du pressiomètre

K_n : estimation à partir du pénétromètre

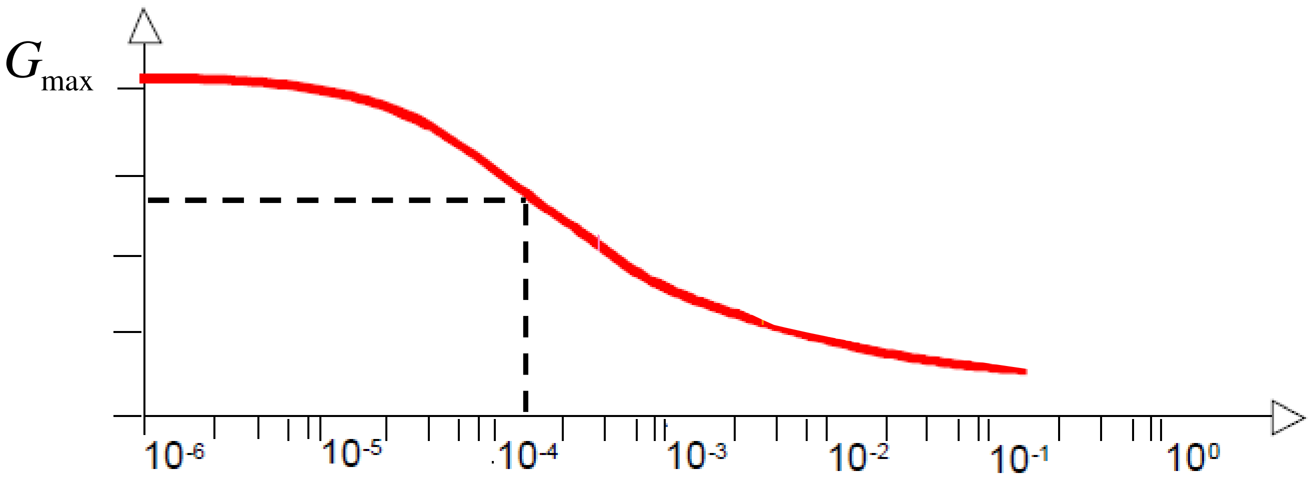
De l'ordre de 200 à 1000 kPa/mm


$K_n = 2G/R$

→ ***Comment estimer le module de cisaillement G ?***

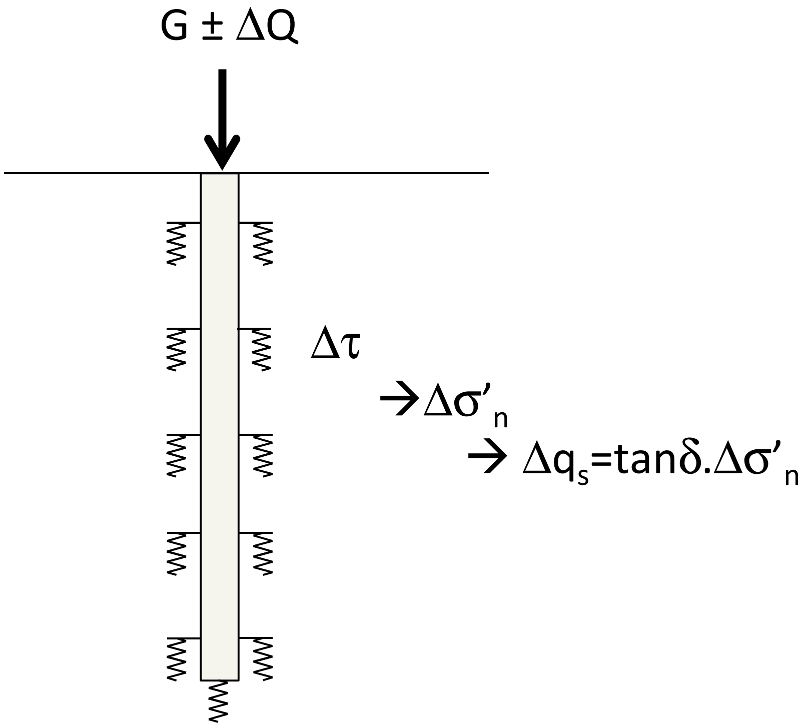


$G_{utilisé}$

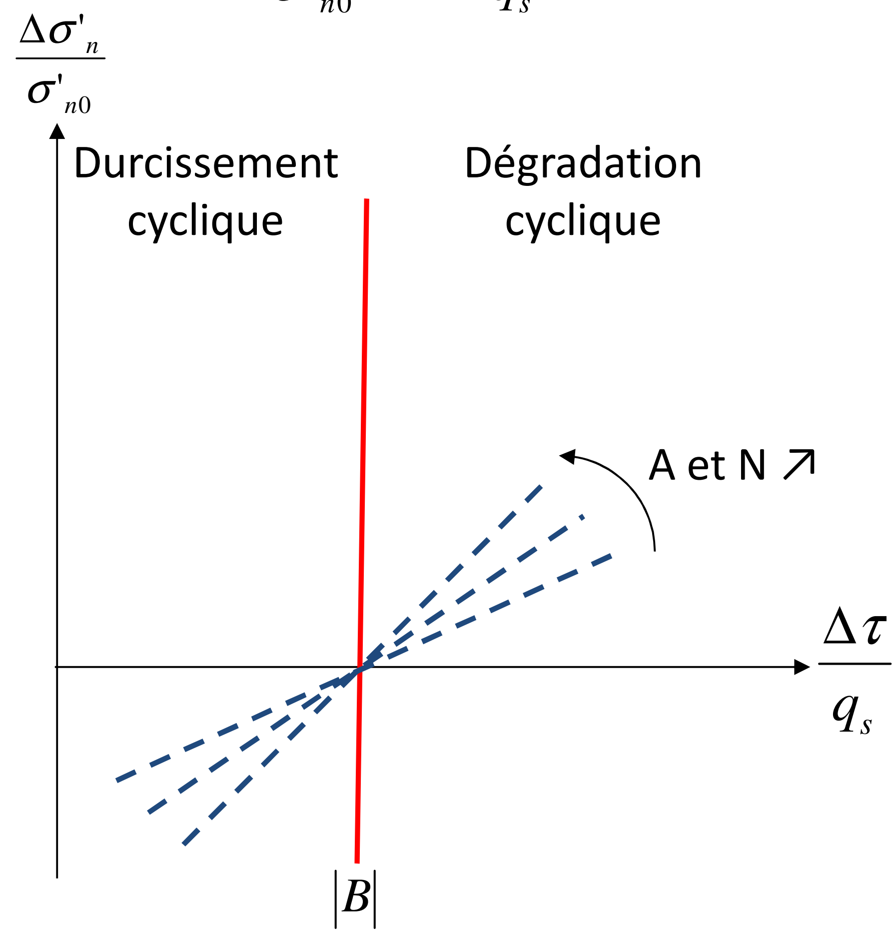
$$G = \frac{G_{max}}{1,55}$$ avec G_{max} calculé avec la formule de *Baldi et al. (1989)*

$$G = 10\left(\frac{E_M}{2(1+\nu)}\right)$$ avec E_M le module pressiométrique

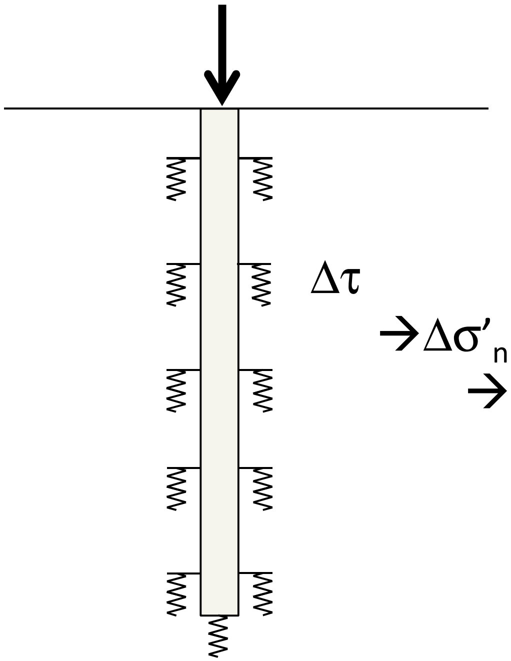
PROCÉDURE DE DÉGRADATION ABC



$$\frac{\Delta\sigma'_n}{\sigma'_{n0}} = A\left(\frac{\Delta\tau}{q_s} + B\right)N^C$$



G ± ΔQ

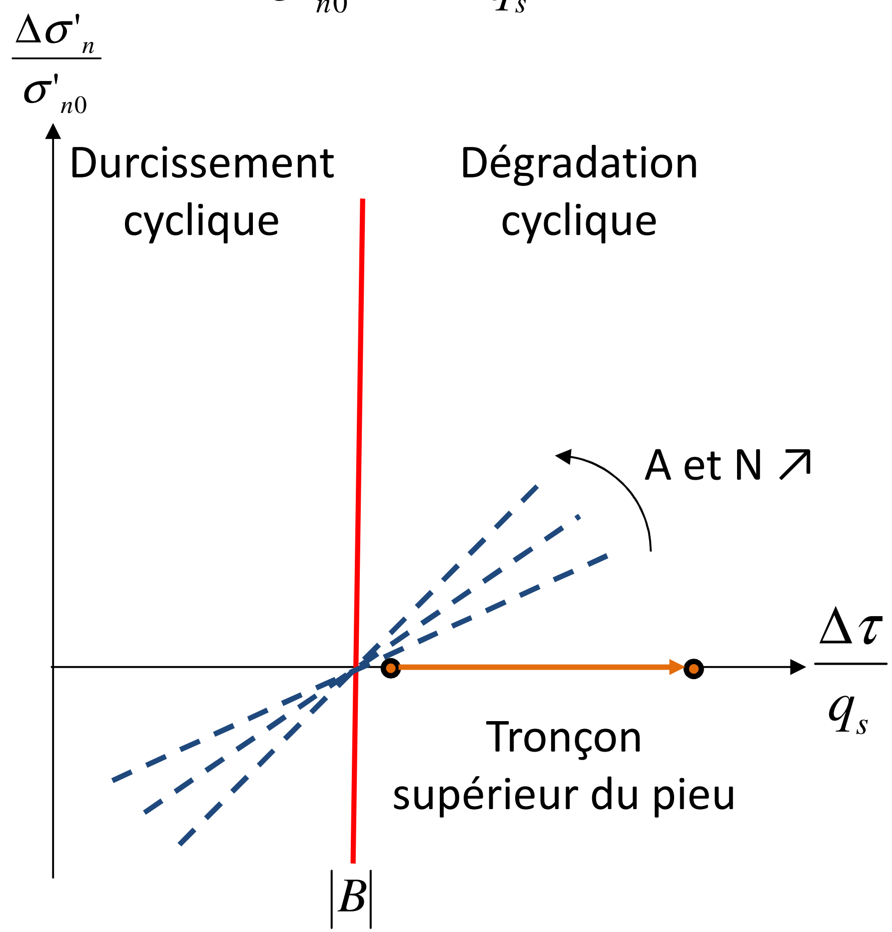


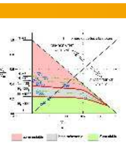
$\Delta\tau$

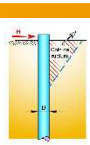
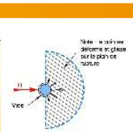
$\rightarrow \Delta\sigma'_n$

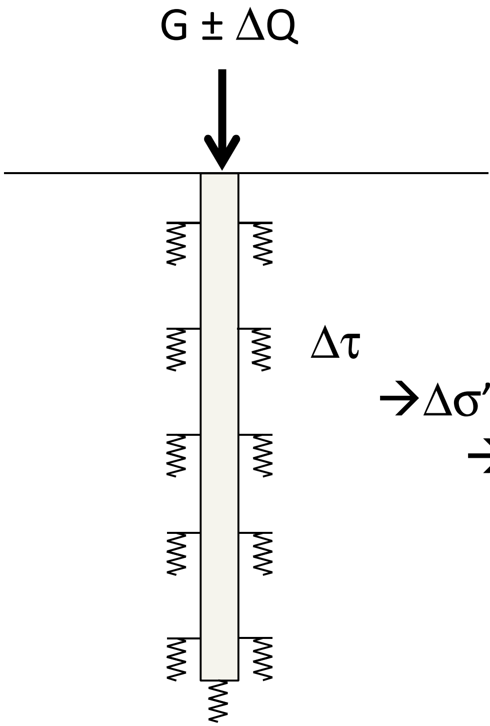
$\rightarrow \Delta q_s = \tan\delta . \Delta\sigma'_n$

$$\frac{\Delta\sigma'_n}{\sigma'_{n0}} = A\left(\frac{\Delta\tau}{q_s} + B\right)N^C$$



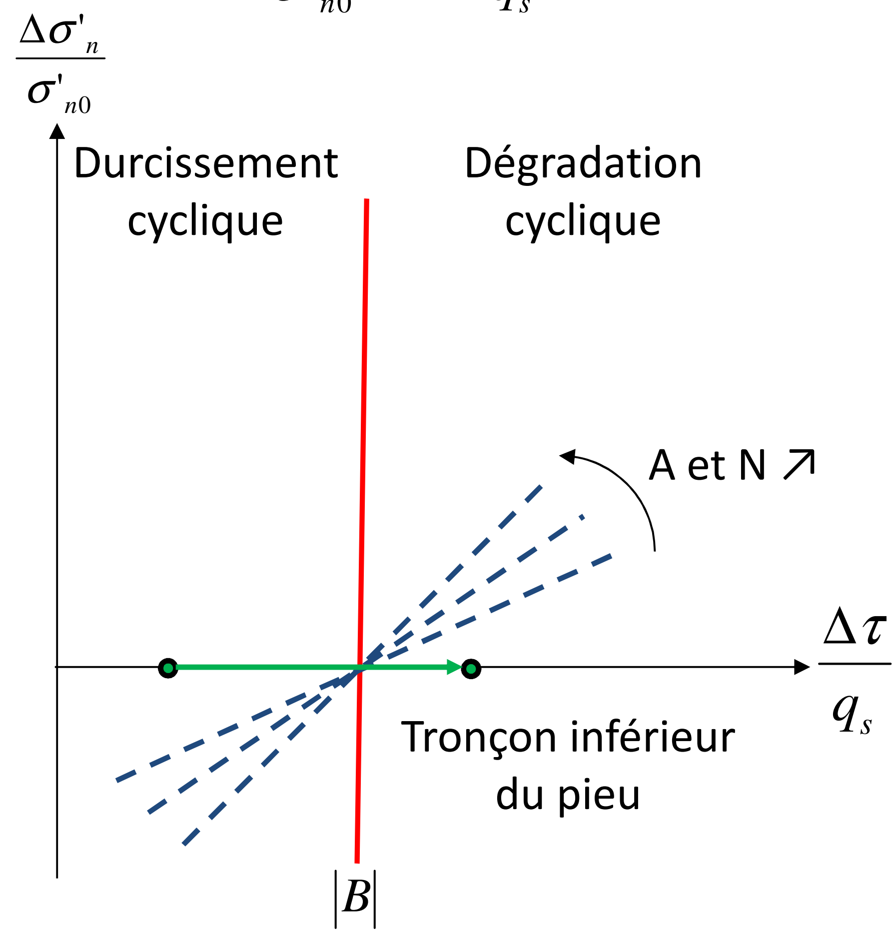



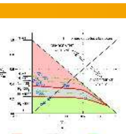
$\Delta\tau$

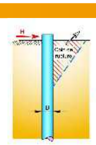
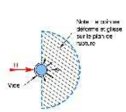
$\rightarrow \Delta\sigma'_n$

$\rightarrow \Delta q_s = \tan\delta . \Delta\sigma'_n$

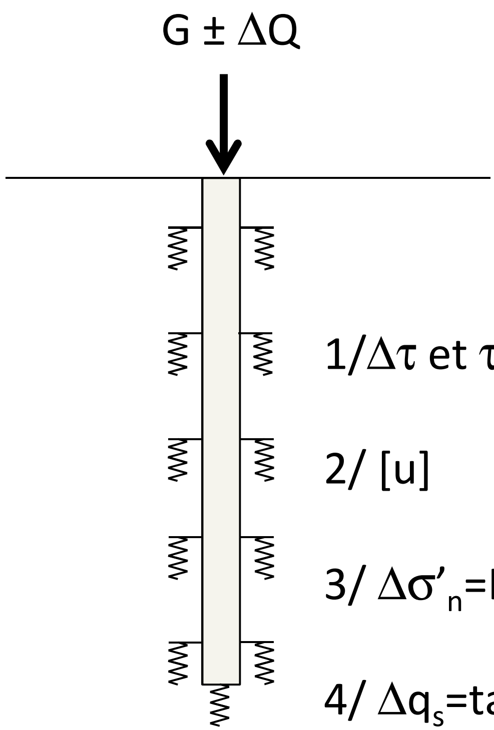
$$\frac{\Delta\sigma'_n}{\sigma'_{n0}} = A\left(\frac{\Delta\tau}{q_s} + B\right)N^C$$




MÉTHODE T-Z ENVELOPPE

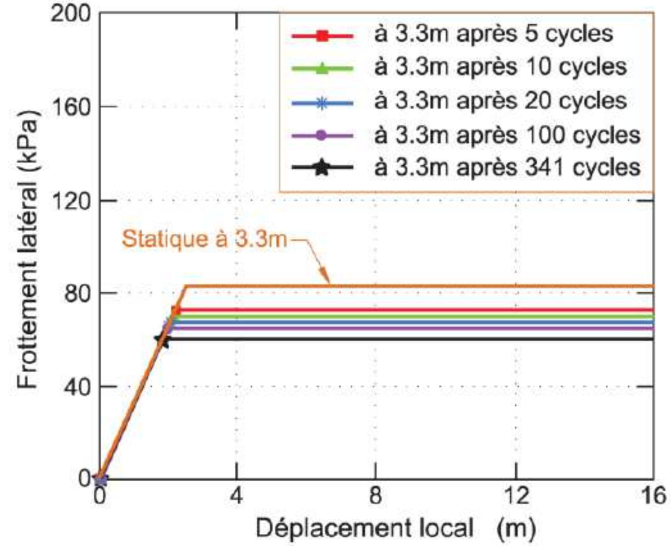


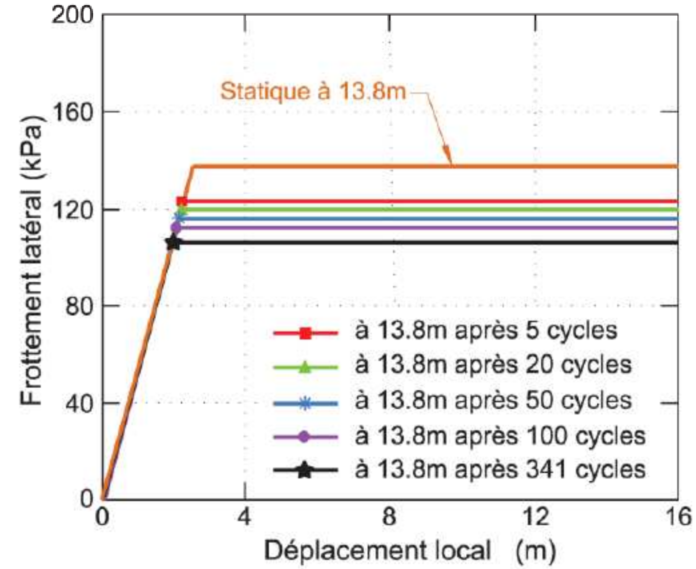
1/ $\Delta\tau$ et τ_{cm}

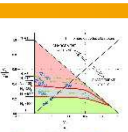
2/ [u]

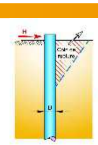
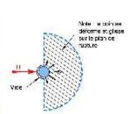
3/ $\Delta\sigma'_n = K_n$ avec $K_n = 2G/R$

4/ $\Delta q_s = \tan\delta . \Delta\sigma'_n$



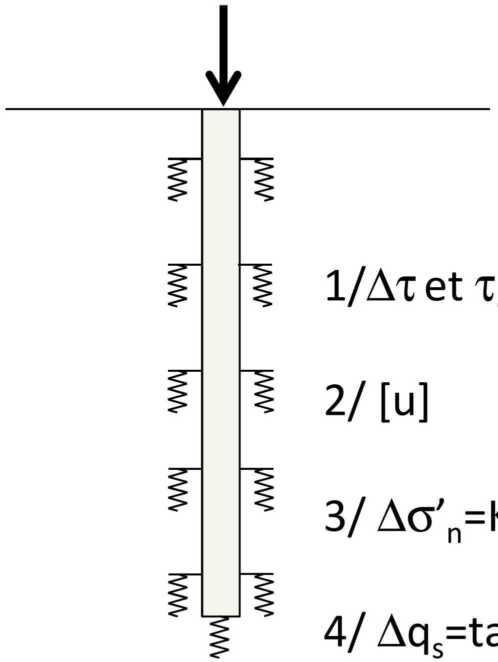



MÉTHODE T-Z ENVELOPPE

$G \pm \Delta Q$

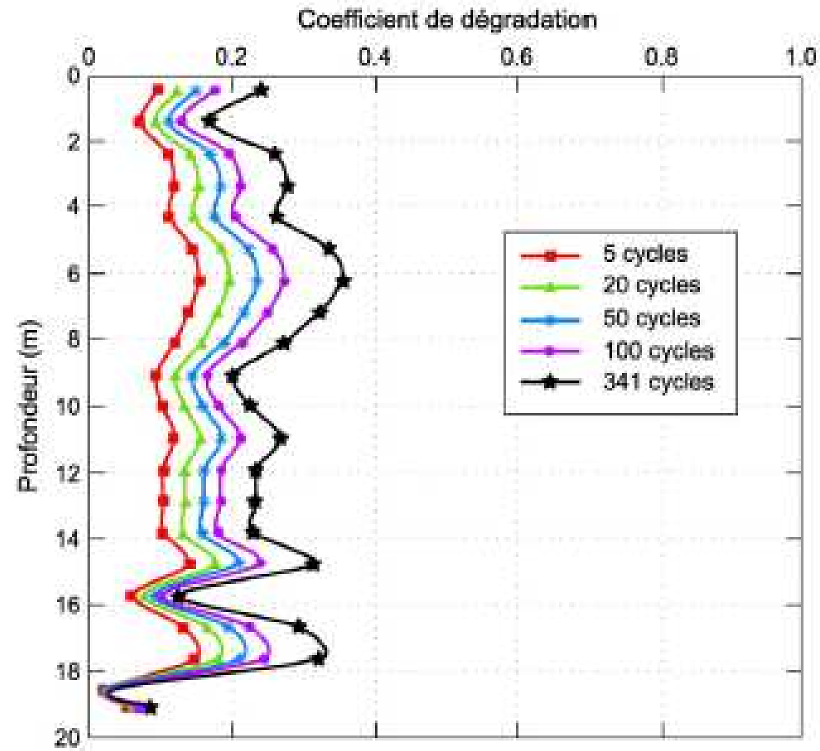


1/ $\Delta\tau$ et τ_{cm}

2/ [u]

3/ $\Delta\sigma'_n = K_n$ avec $K_n = 2G/R$

4/ $\Delta q_s = \tan\delta . \Delta\sigma'_n$

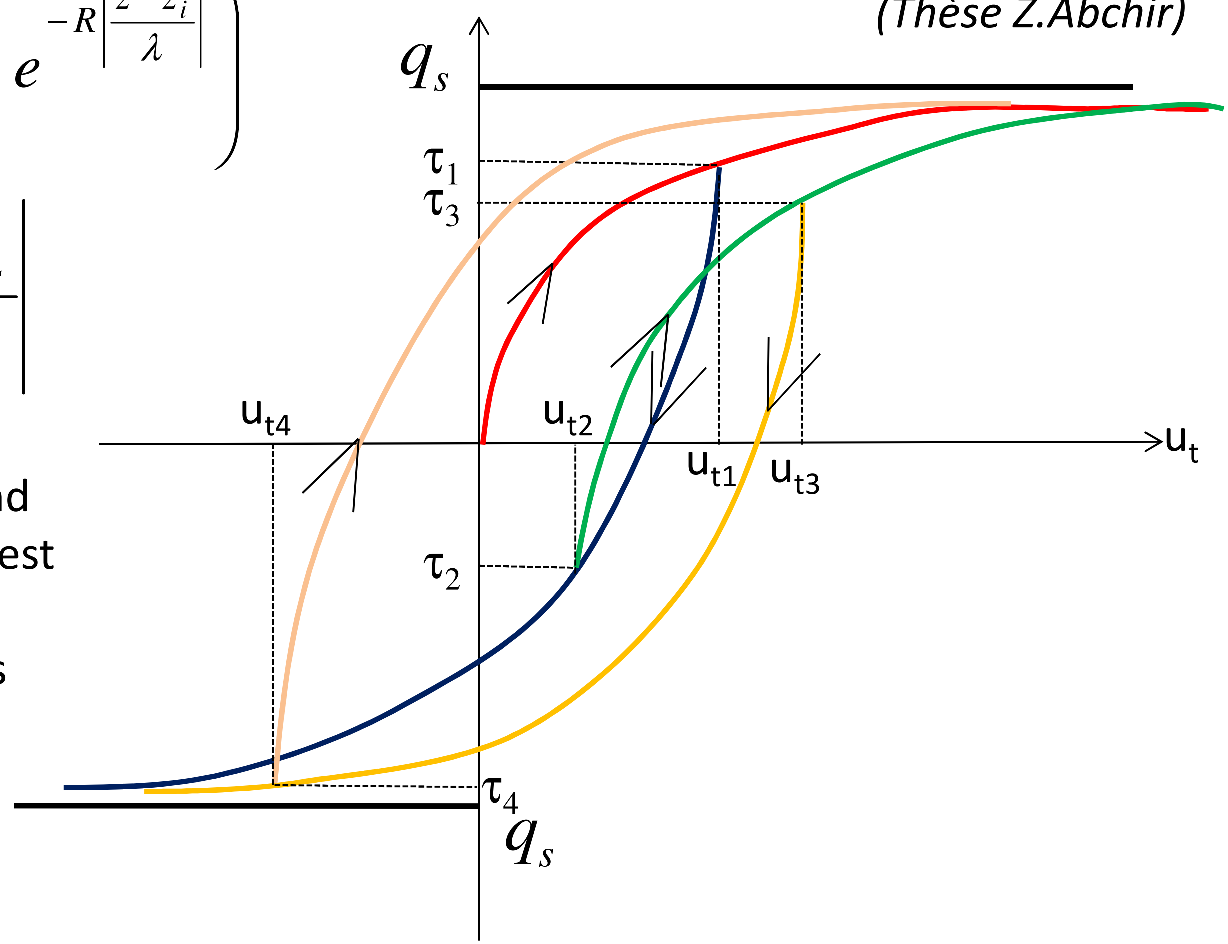


→Evolution de la résistance cyclique (actualisation du processus de dégradation au cours des cycles)
→Estimation du déplacement du pieu avec les cycles

$$\tau = \tau_i + A(-1)^{i+1} q_s \left(1 - e^{-R\left|\frac{z - z_i}{\lambda}\right|} \right)$$

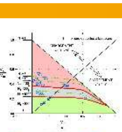
$$A = \left| \frac{\tau_i - (-1)^{i+1} q_s}{q_s} \right|$$

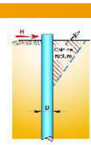
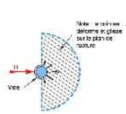
(Thèse Z.Abchir)



La raideur en décharge dépend de la contrainte atteinte, elle est multipliée par 1 à 2.
Elle peut évoluer au cours des cycles avec le paramètre R.

→ ***Commet varie le frottement axial au cours des cycles ?***

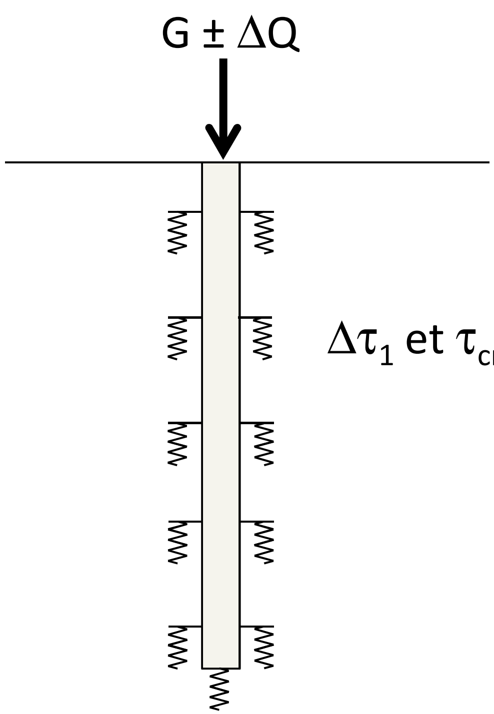




MÉTHODE TZC-SOLCYP

- La variation de frottement axial est associée à une variation de la contrainte normale :

$$\Delta q_s(i) = \tan(\delta) * \Delta\sigma'_n$$

- Un premier cycle de chargement est appliqué pour déterminer à chaque profondeur les variations de contraintes: $\Delta\tau_1$ et τ_{cm1}.

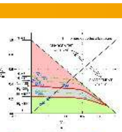


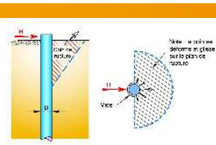
$\Delta\tau_1$ et τ_{cm1} → estimation de la variation du déplacement normal [u] à l'interface sol-pieu

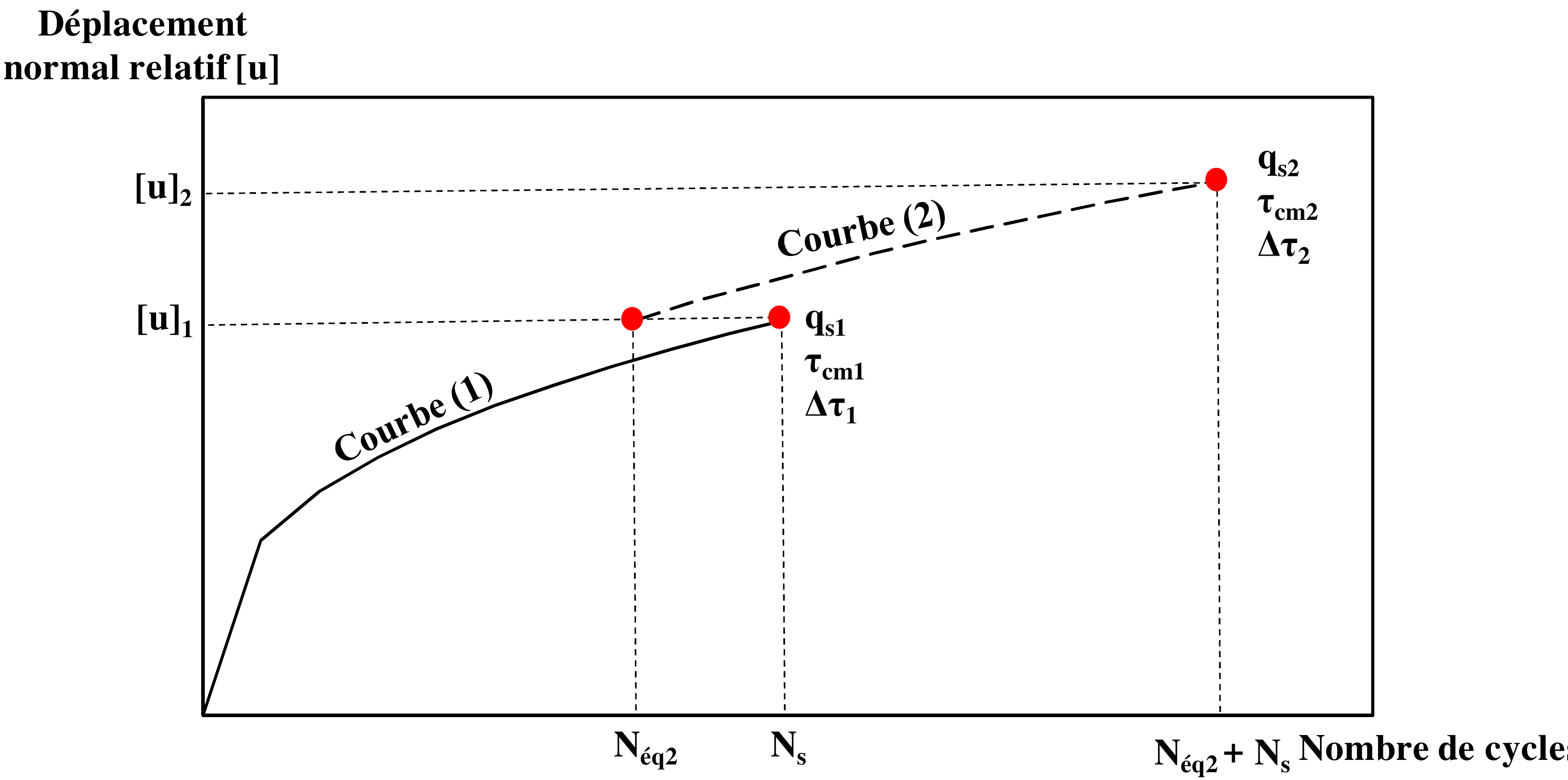
→ variation de la contrainte normale σ'_n à l'interface sol-pieu :

$\Delta\sigma'_n$=K_n [u] avec *K_n=2G/R*

Voir base de données L3SR

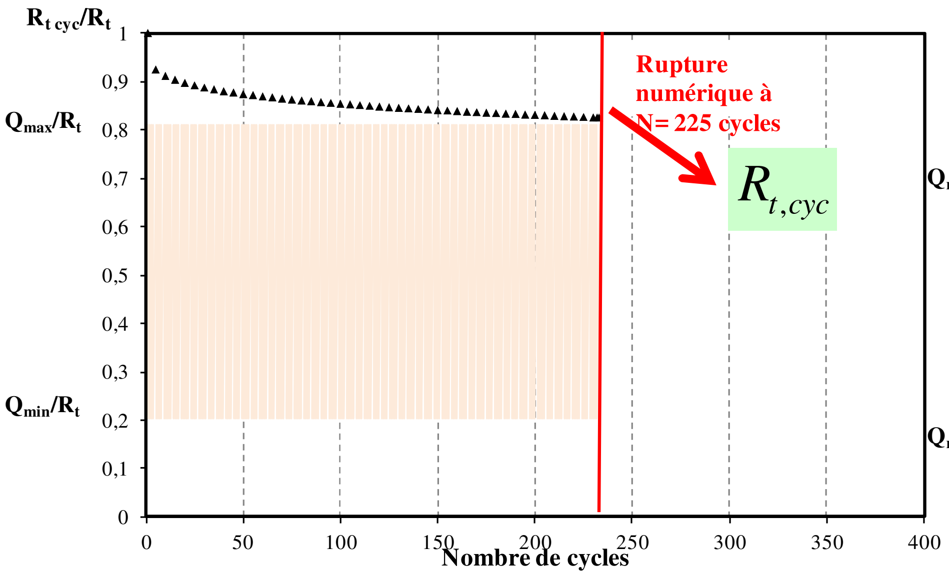





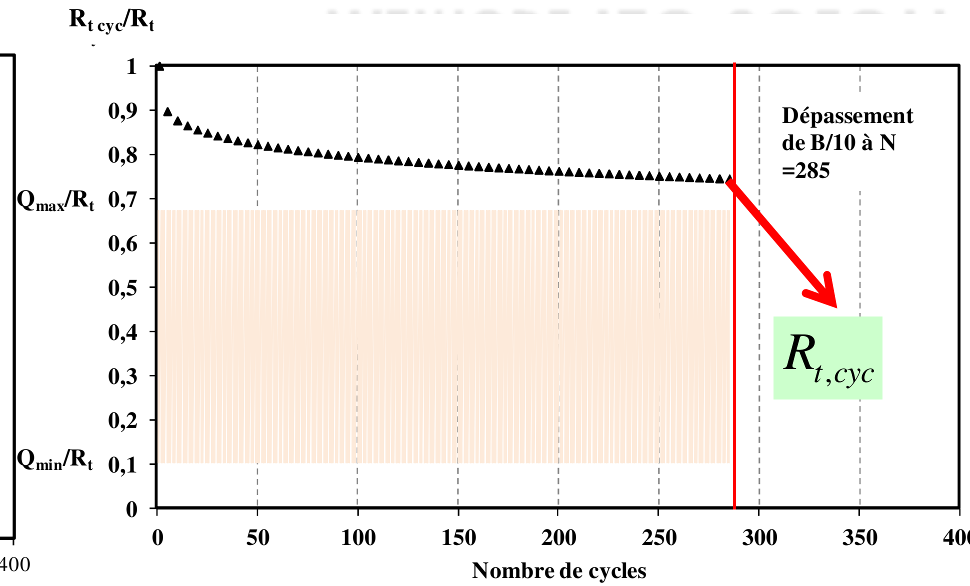



Actualisation des courbes de dégradation :

$$f_1\left(\tau_{cm1}, \Delta\tau_1, N_{éq1} + N_s\right) = f_2\left(\tau_{cm2}, \Delta\tau_2, N_{éq2}\right)$$



Mesure : 345 cycles



Mesure : 367 cycles

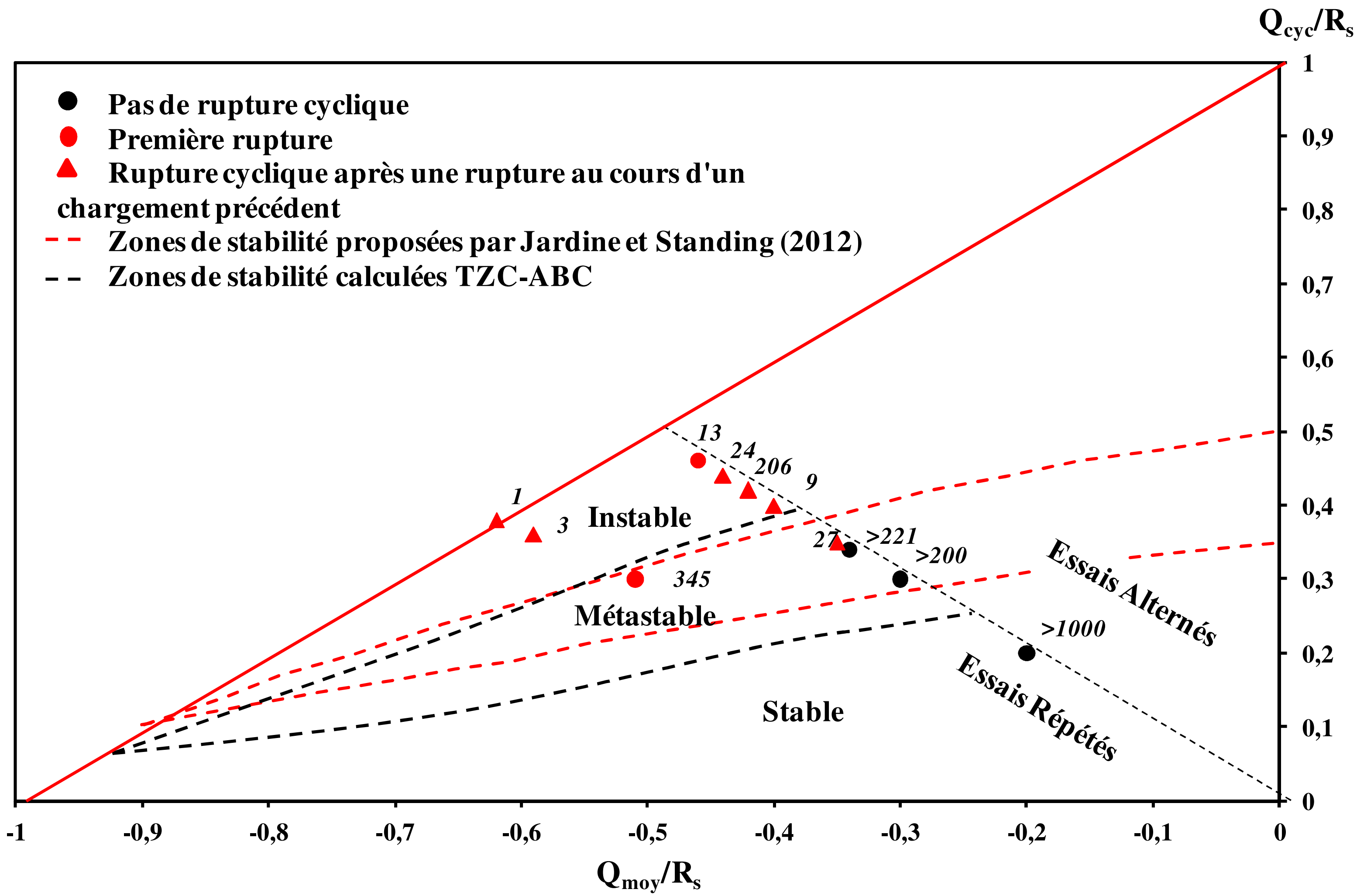
Justifications à réaliser sur un cas réel (dans un format LRFD) :

$$\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k < \frac{R_{t,cyc}}{\gamma_R}$$

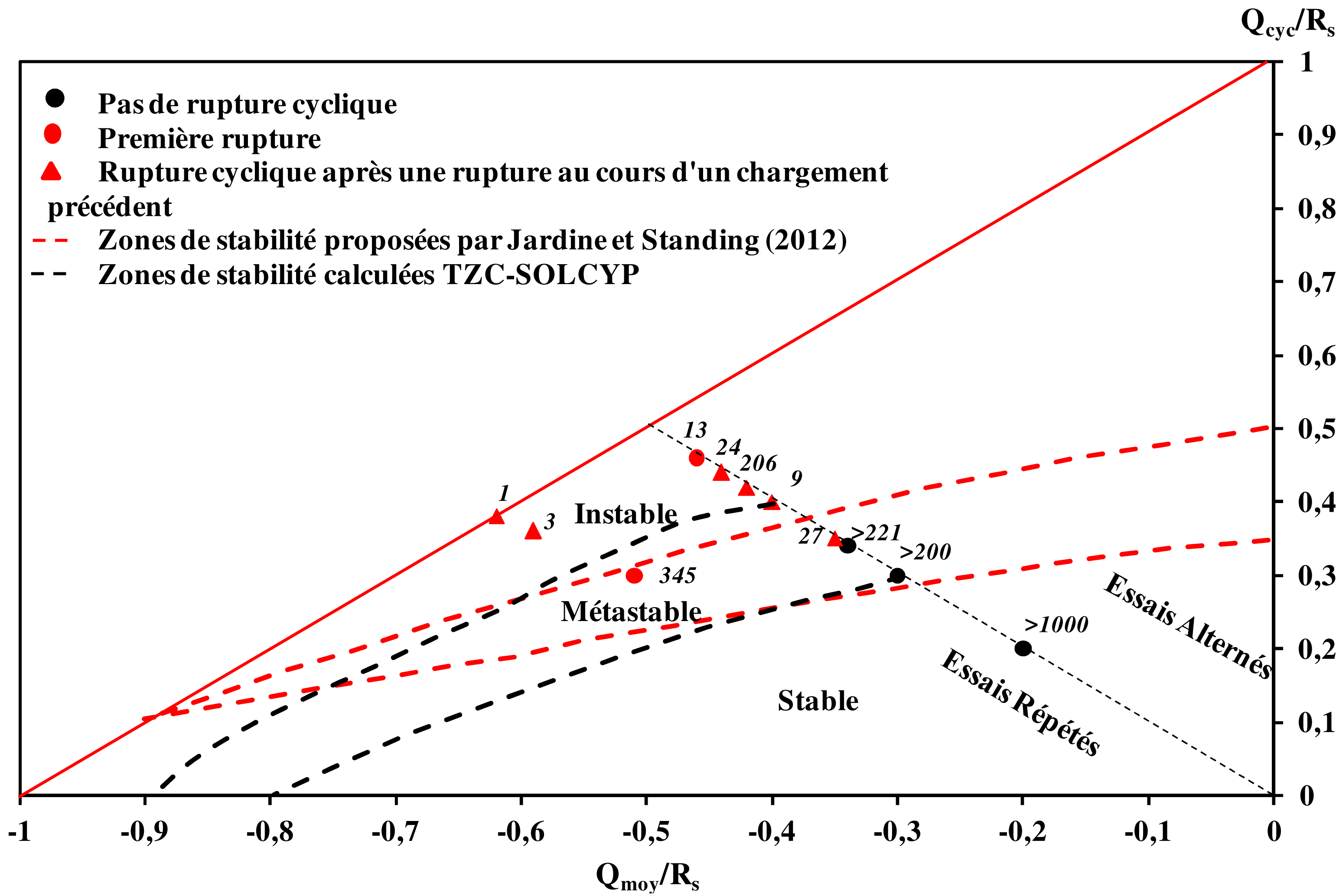
En traction

$$\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k < \frac{R_{c,cyc}}{\gamma_R}$$

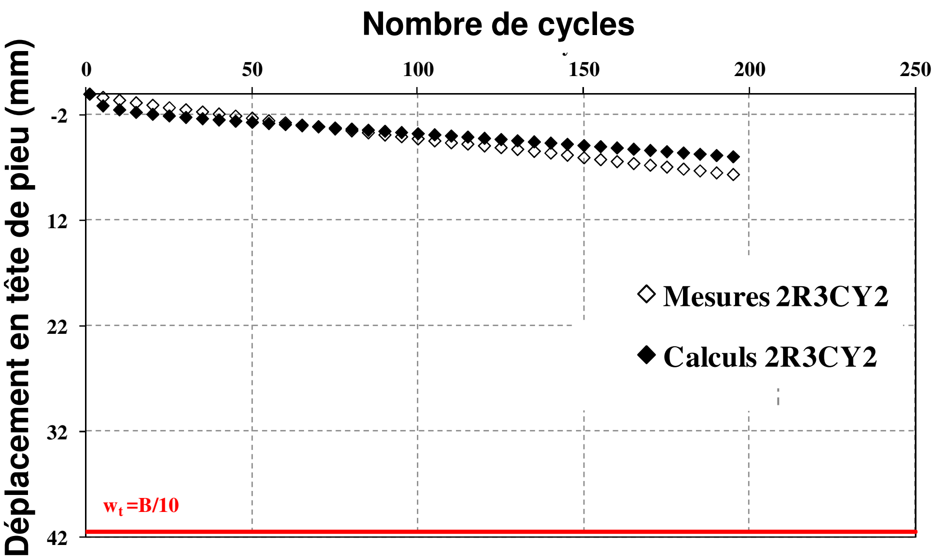
En compression

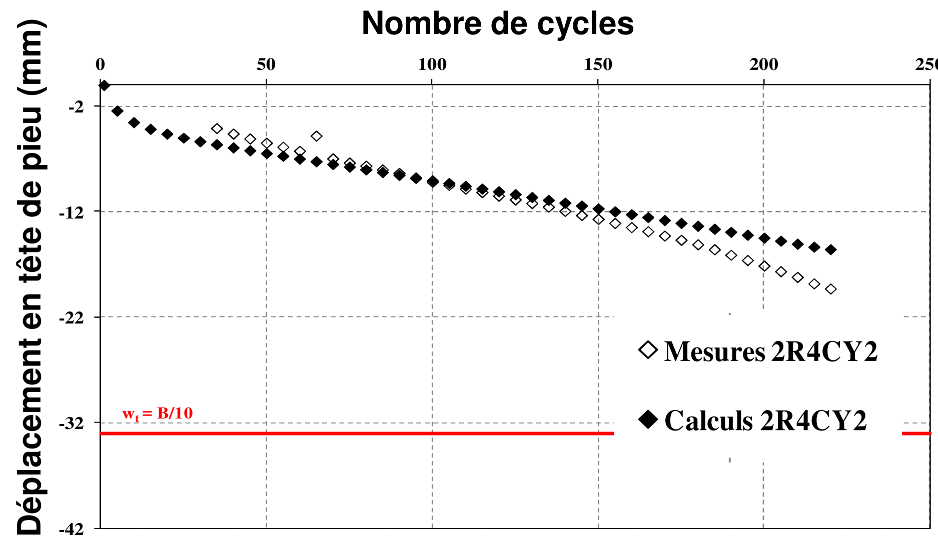

Pas de rupture cyclique
Première rupture
Rupture cyclique après une rupture au cours d'un chargement précédent
Zones de stabilité proposées par Jardine et Standing (2012)
Zones de stabilité calculées TZC-ABC
Q_{cyc}/R_s
Q_{moy}/R_s
Instable
Métastable
Stable
Essais Alternés
Essais Répétés
1
3
13
24
206
9
27
>221
>200
345
>1000
-1
-0,9
-0,8
-0,7
-0,6
-0,5
-0,4
-0,3
-0,2
-0,1
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1

MÉTHODE TZC-SOLCYP

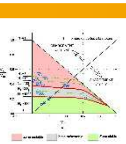


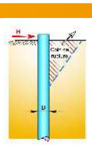
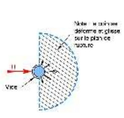
Sable, Dunkerque, GOPAL

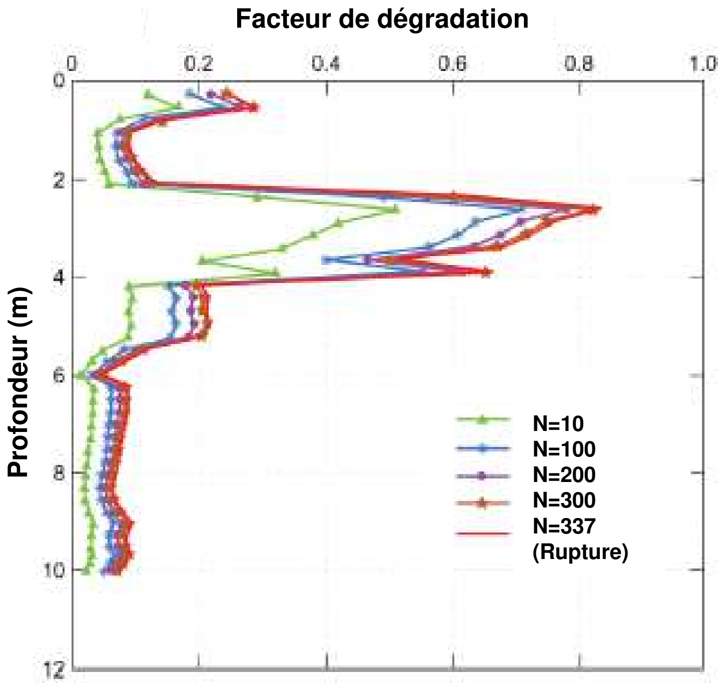


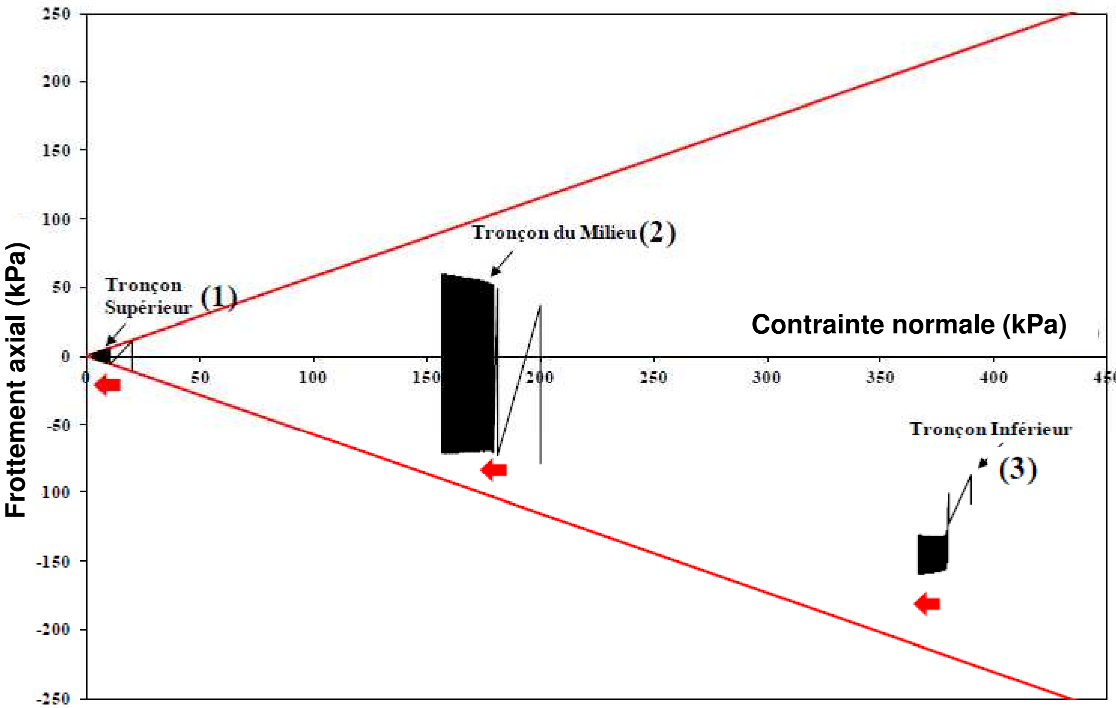


La méthode développée fonctionne bien tant que le pieu ne présente pas un changement de comportement : d'une zone stable ou métastable vers une zone instable.

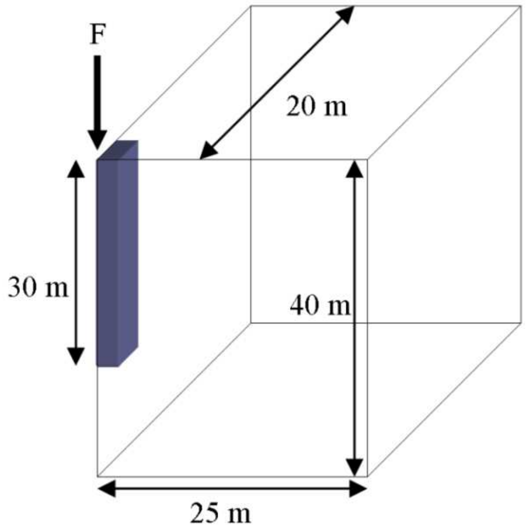



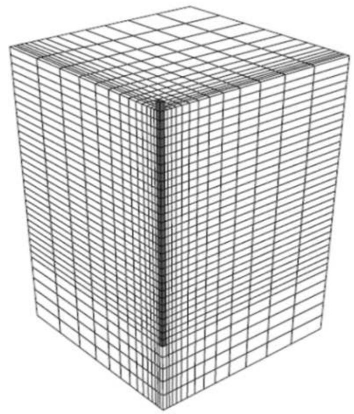



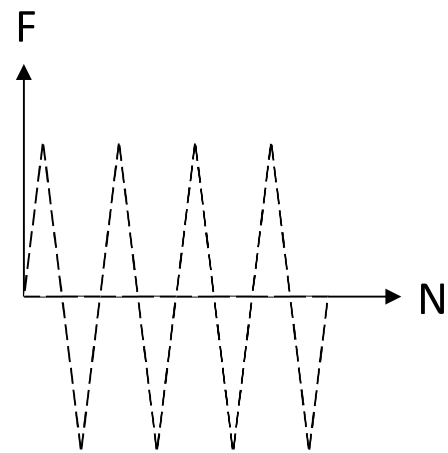


Facteur de dégradation
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Profondeur (m)
0
2
4
6
8
10
12
N=10
N=100
N=200
N=300
N=337
(Rupture)

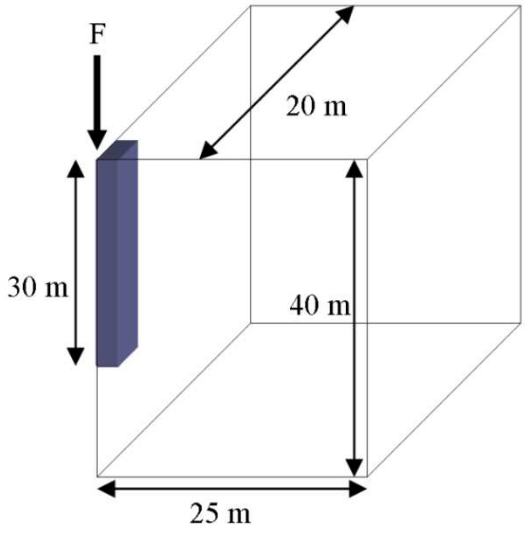

Frottement axial (kPa)
Contrainte normale (kPa)
Tronçon Supérieur (1)
Tronçon du Milieu (2)
Tronçon Inférieur (3)
250
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
-250
50
100
150
200
250
300
350
400
450

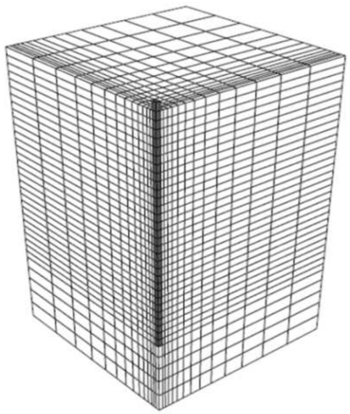
MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

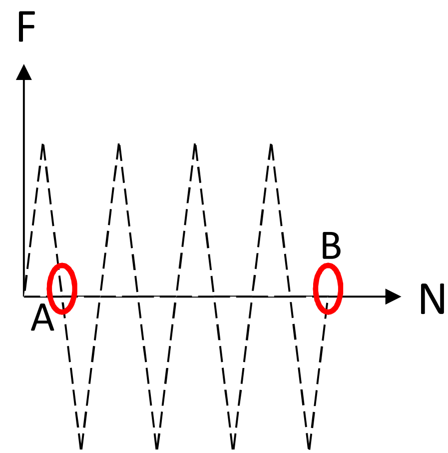




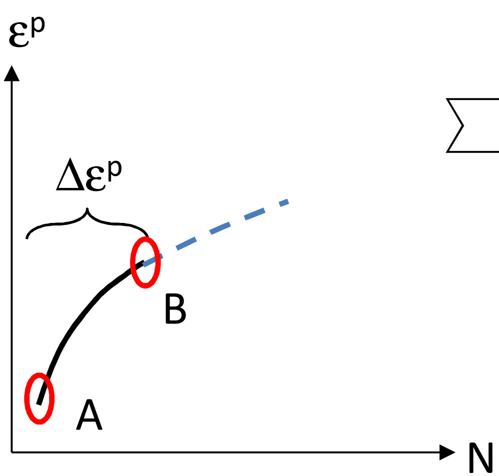






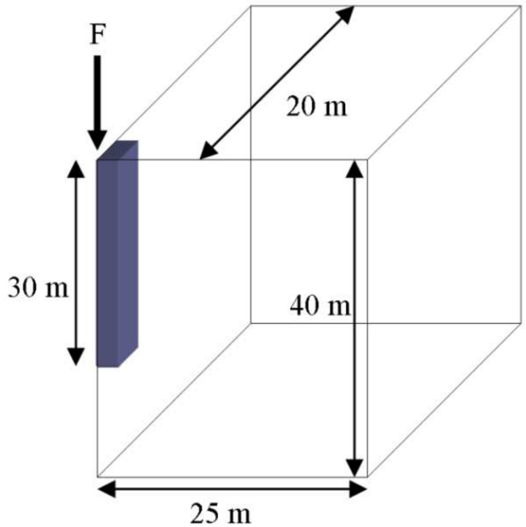


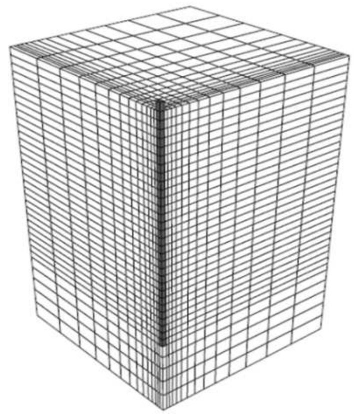
Approche numérique

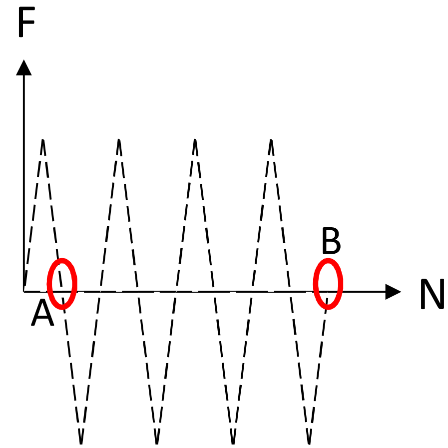


$$\Delta F = \int {}^{t}B C \Delta \varepsilon^{p} d\Omega$$

(Vecteur de force nodale)

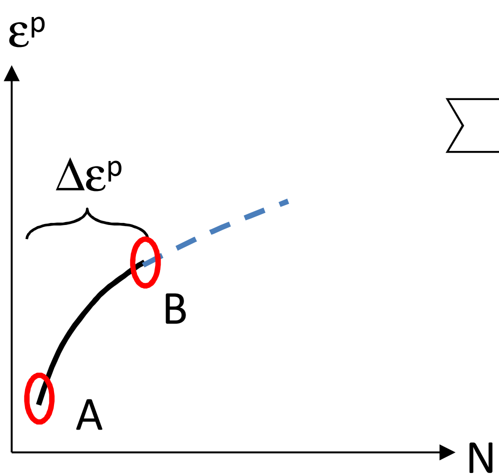






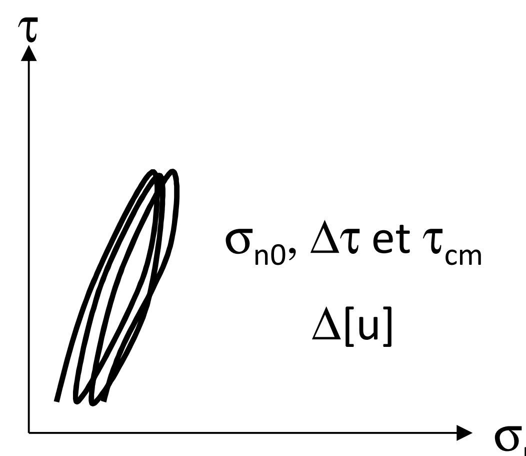
Approche numérique

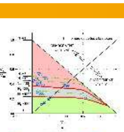
Approche numérique et expérimentale

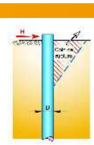
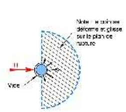


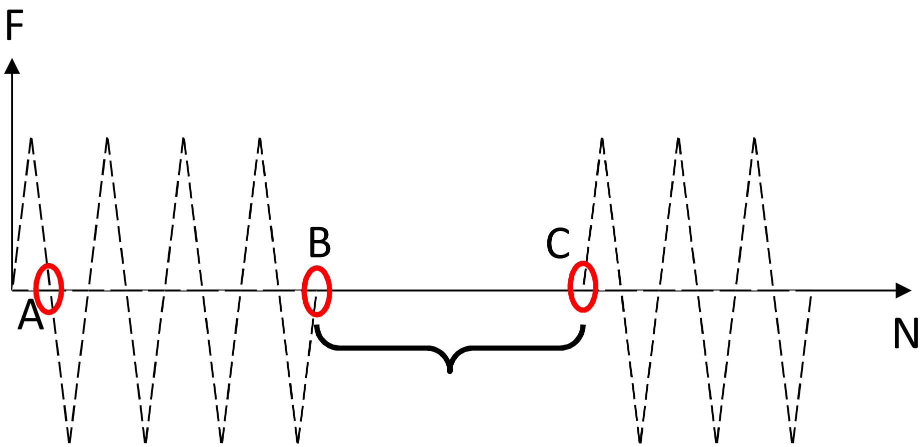
$$\Delta F = \int {}^{t}B C \Delta\, \varepsilon^{p} d\Omega$$

(Vecteur de force nodale)

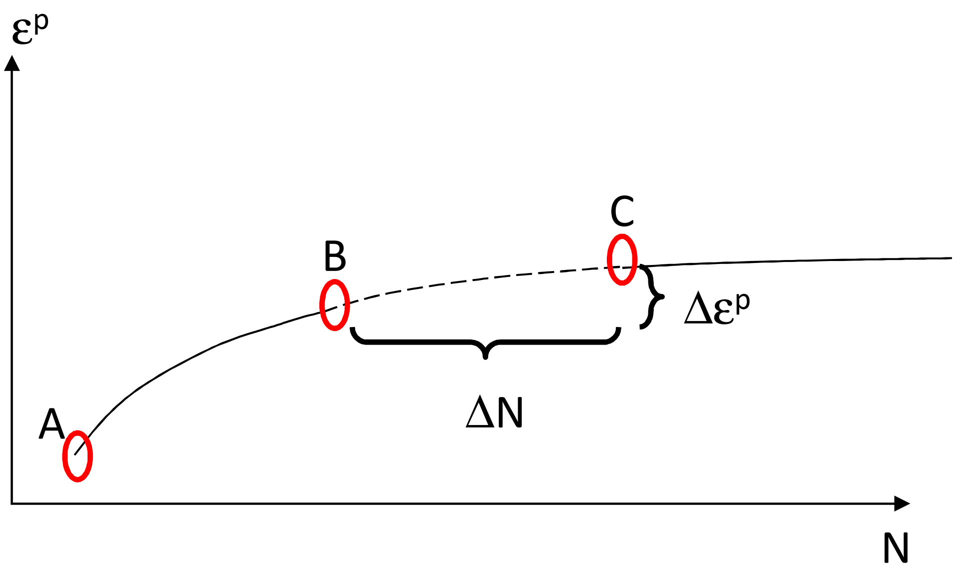


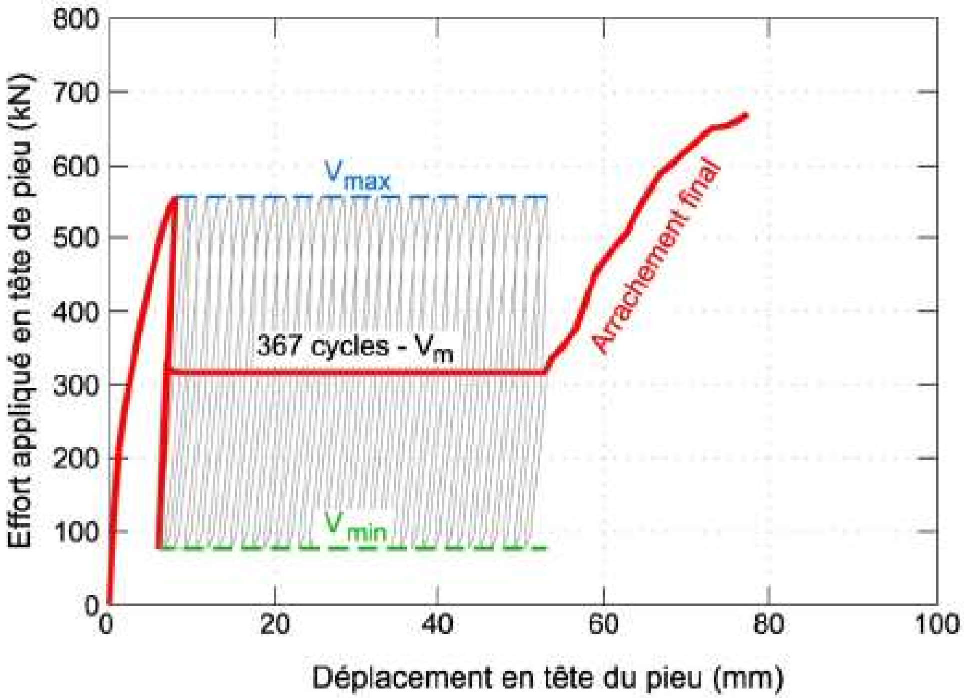



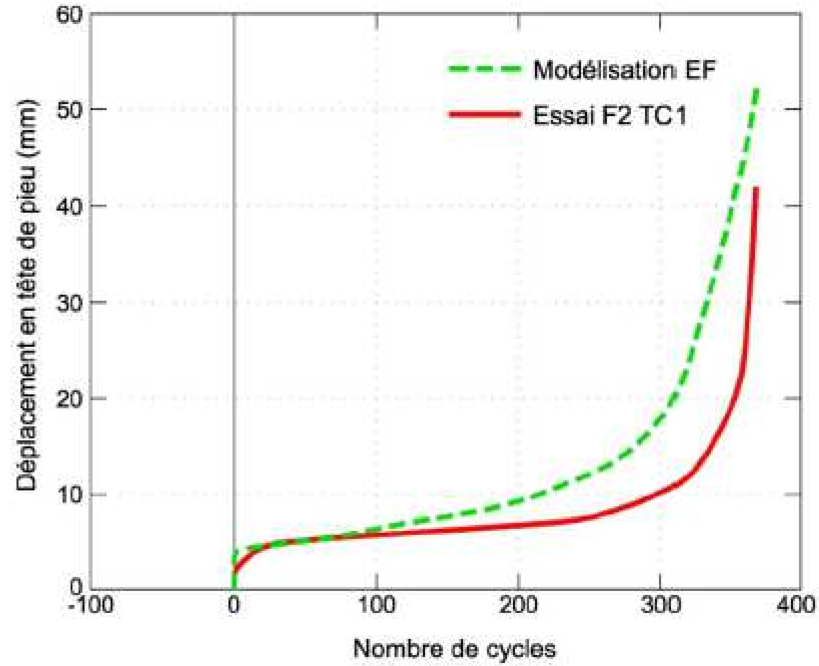
Le chargement global appliqué sur les cycles précédents est nul mais des formations plastiques apparaissent



$$\Delta F = \int {}^{t}B C \Delta \varepsilon^{p} d\Omega$$

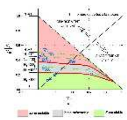
(Vecteur de force nodale)

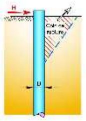
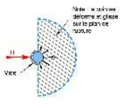

Effort appliqué en tête de pieu (kN)
Déplacement en tête du pieu (mm)
V_{max}
V_{min}
367 cycles - V_m
Arrachement final
0
100
200
300
400
500
600
700
800
0
20
40
60
80
100


Déplacement en tête de pieu (mm)
Nombre de cycles
Modélisation EF
Essai F2 TC1
0
10
20
30
40
50
60
-100
0
100
200
300
400

LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE CALCUL

Méthodes de calcul	Disponibilités des données	Robustesse du calcul	Fiabilité du calcul	Temps de calcul	Facilité d'utilisation
t-z enveloppe	++	++	-/+	+	+
t-z cycle à cycle	++	+	+	+	+
méthode des éléments finis ou des différences finies	-	-/+	-/+	-	-/+

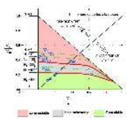



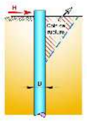
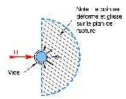

CONCLUSIONS

- L'estimation de la capacité portante cyclique reste une tâche complexe pour laquelle des solutions raisonnables existent avec divers degrés de difficultés.

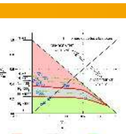
- Le calcul des déplacements de pieux soumis à des charges cycliques reste malgré tout délicat. Divers points restent à examiner : l'état initial, le frottement axial limite qui dépend de la dilatance potentielle du sol, les effets du temps, etc.

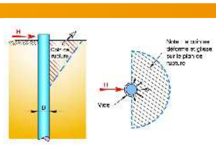
- La construction de diagrammes de stabilité cyclique est un résultat prometteur pour la conception de pieux soumis à charges cycliques.


- **Aux différents étudiants, doctorants, post-doctorants etc.**
- **Aux différents laboratoires impliqués dans le Projet ANR**
- **Aux différents membres du groupe de rédaction**




Merci de votre attention