

« Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal »
Cahier technique n° 38 - Publication AVRIL 2017



REUNION DU 4 mai 2017 PRÉSENTATION

P. BERTHELOT Président du Groupe de travail



« Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal »
Cahier technique n° 38 - Publication AVRIL 2017



Effets cinématiques et leur prise en compte

D.FOLLIARD (Fugro)



SOMMAIRE

1/ GENERALITES

2/ DETERMINATION DES MODULES DE REACTION HORIZONTALE

3/ LES METHODES DE CALCUL DE LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

- Méthodes forfaitaires avec « dg »
- Etudes particulières avec « d_{\max} »

4/ EXEMPLES DE CALCUL CINEMATIQUE

5/ LE CUMUL DES EFFETS INERTIELS ET CINEMATIQUES



1. GENERALITES

Synthèse des cas à prendre en considération pour l'étude des effets inertiels et cinématiques sur les pieux :

Zone 2

	I et II	III	IV
A		I	I
B		I	I
C		I	I
D		C+I	C+I
E		C+I	C+I
S1		C+I	C+I
S2		C+I	C+I

Zone 3 à 5

	I	II	III	IV
A		I	I	I
B		I	I	I
C		I	I	I
D		I	C+I	C+I
E		I	C+I	C+I
S1		I	C+I	C+I
S2		I	C+I	C+I

Ces cas font référence au § 5.4.2 (6) P de l'EC8-5 demandant à ce que toutes les conditions soient « réunies simultanément » et en prenant en compte les remarques 1 et 2 suivantes, à savoir :

- « *Le profil de sol est de classe D, S1 ou S2 et contient des couches consécutives dont la rigidité diffère nettement. (+ Remarque 1)* »
- *La zone est de sismicité modérée ou forte, c'est-à-dire lorsque le produit « $a_g \cdot S$ » dépasse 0,10 g (0,98 m/s²) et la structure supportée est de catégorie d'importance III ou IV (+ Remarque 2). »*



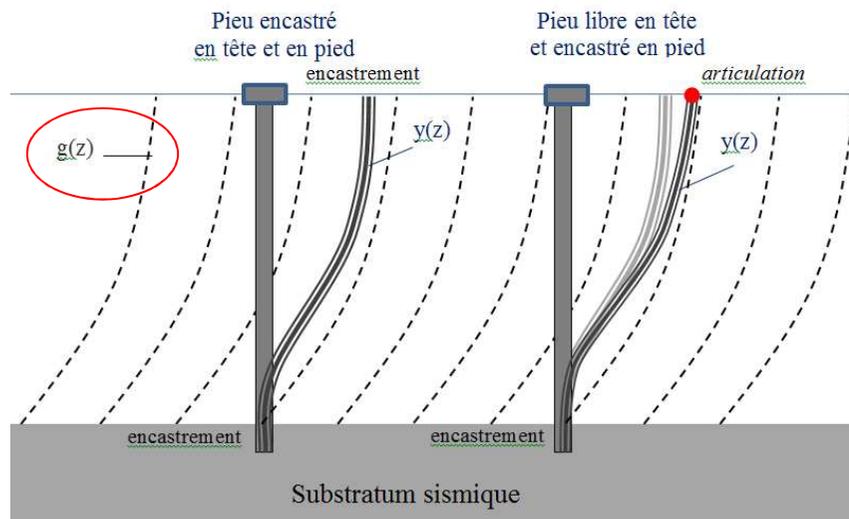
1. GENERALITES

Sous actions sismiques, le sol se déplace horizontalement. Ce déplacement latéral en fonction de la profondeur « z » est appelé **déplacement en champ libre** et est noté « $g(z)$ ».

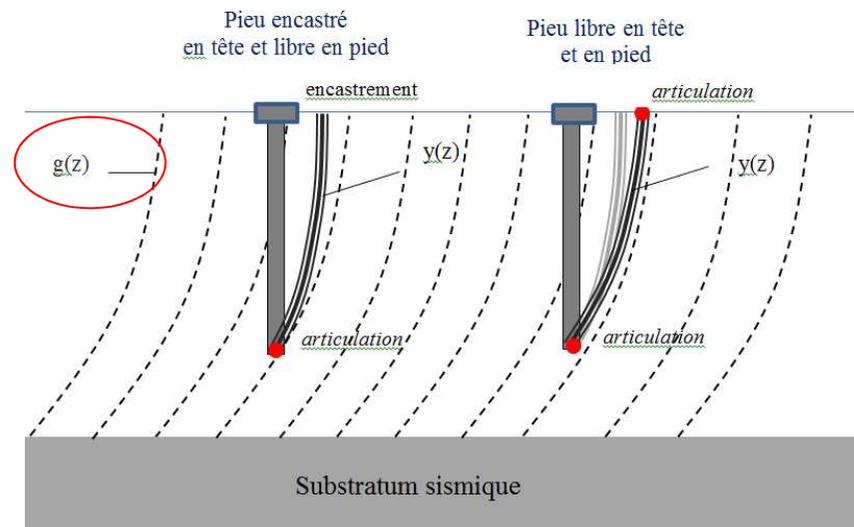
A un niveau de cote « z » donné, les efforts sur un pieu soumis à des poussées latérales du sol sont fonction de la différence entre le déplacement d'équilibre « $y(z)$ » et le déplacement libre du sol noté « $g(z)$ ».

L'action induite sur le pieu est donnée par la loi suivante : $p = kc \cdot [y(z) - g(z)]$.

Comparaison entre un pieu ancré en pied avec encastrement en tête et un pieu ancré en pied et libre en tête.



Comparaison entre un pieu libre en pied avec encastrement en tête et un pieu libre en pied et en tête.



1. GENERALITES

En conséquence pour définir les effets cinématiques sur un pieu, il faut définir :

- Les valeurs du **coefficient de réaction** linéique « K_c » ou surfacique « k_c »
- La **déformation du sol en champ libre** « $g(z)$ »
- La déformation du pieu « $y(z)$ » soumis à $g(z)$
- Les **conditions en tête de pieu** limitées aux deux cas suivants : rotulées ou encastées **dans les mêmes conditions que pour le calcul inertiel.**



2. DETERMINATION DES MODULES DE REACTION HORIZONTALE

La valeur du module de réaction linéique « K_c » est obtenue à partir du module de cisaillement dynamique « G » du sol selon les lois de dégradations.

Elle peut être déterminée de la façon suivante (Gazetas G. 1993) :

$K_c = k_c \cdot B$

$K_c = 1,2 \cdot E_{sism} \text{ [MPa]}$

$E_{sism} = 2 \cdot (1+\nu) \cdot G$

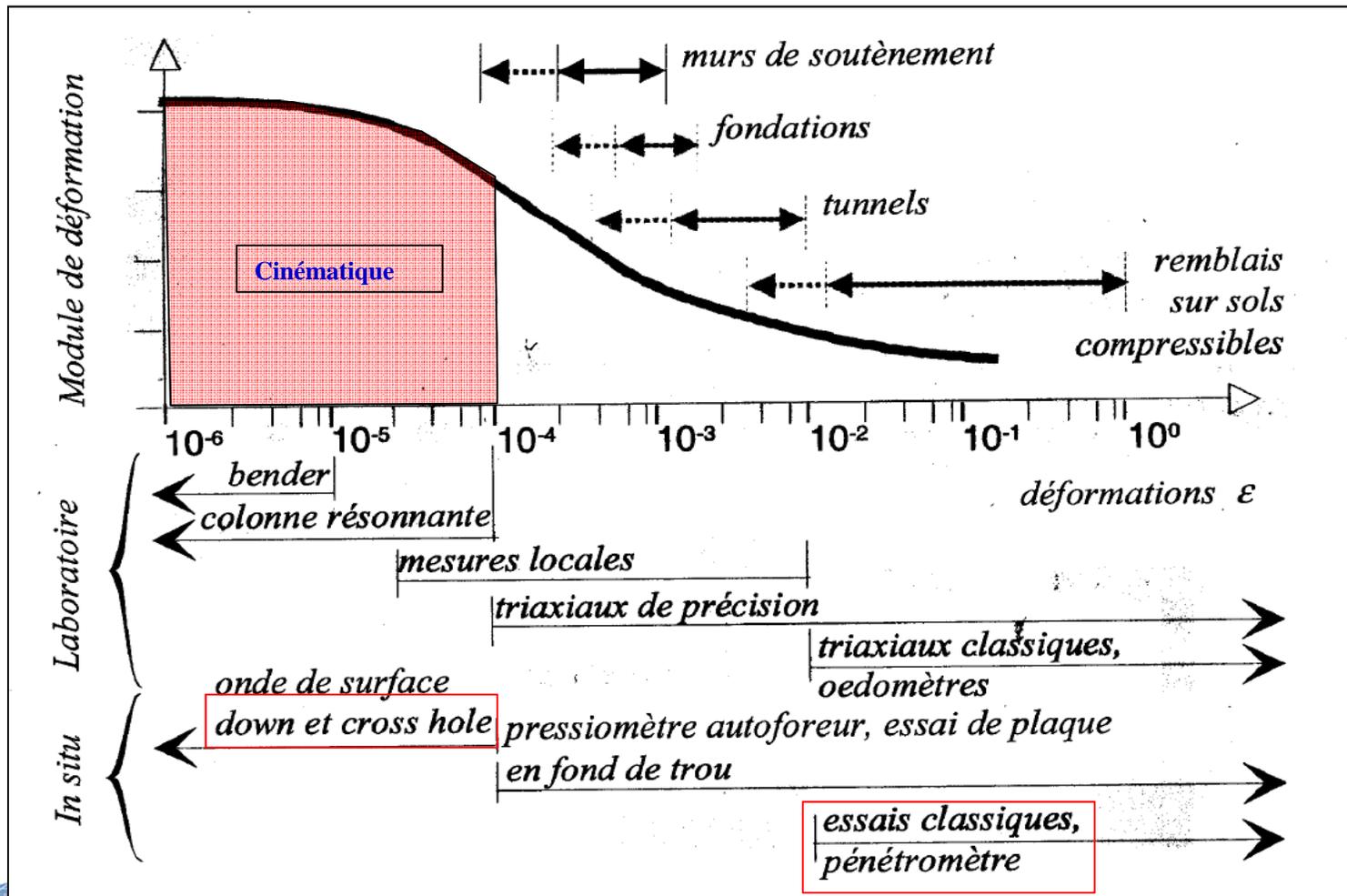
Avec :

- ν : coefficient de poisson
- G : module de cisaillement déterminé au niveau de déformation attendu pour l'action sismique de calcul.



2. DETERMINATION DES MODULES DE REACTION HORIZONTALE

Modules de cisaillement G_{\max} (ou $V_{s_{\max}}$) obtenue préférentiellement par des essais : **Cross Hole, Down Hole, up-Hole, sismocône.**



2. DETERMINATION DES MODULES DE REACTION HORIZONTALE

Coefficient d'amortissement et de réduction :

Tableau n° 17 : Coefficients moyens d'amortissement interne de sol et coefficients de réduction moyens (\pm un écart-type) pour la vitesse « V_s » des ondes de cisaillement et pour le module de cisaillement « G », jusqu'à une profondeur de 20 m.

Rapport d'accélération du sol, $\alpha - S$	Coefficient d'amortissement max.	$\frac{v_g}{v_{s,max}}$	$\frac{G}{G_{max}}$
0,10	0,03	0,90 (\pm 0,07)	0,80 (\pm 0,10)
0,20	0,06	0,70 (\pm 0,15)	0,50 (\pm 0,20)
0,30	0,10	0,60 (\pm 0,15)	0,36 (\pm 0,20)

$v_{s,max}$ est la valeur moyenne de v_s à faibles déformations ($< 10^{-5}$), ne dépassant pas 360 m/s ;

G_{max} est le module de cisaillement moyen à faibles déformations.

NOTE Les variations \pm un écart-type permettent au concepteur d'introduire différents degrés de conservatisme selon des facteurs tels que la rigidité et la stratification du profil du sol. Il serait par exemple possible d'utiliser des valeurs de $v_g/v_{s,max}$ et de G/G_{max} supérieures à la moyenne pour des profils plus raides, et des valeurs $v_g/v_{s,max}$ et G/G_{max} inférieures à la moyenne pour des profils plus mous.



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

A - CHOIX DE LA METHODE

CONDITIONS		METHODE	DEFORMEE	$g(z)$
Pieu non ancré dans le substratum sismique et en sol homogène	Monocouche	Forfaitaire	d_g	quart de sinusoïde
	Bicouche	Forfaitaire	d_g	Approche A. Pecker
Pieu ancré dans le substratum sismique ou Profil de sol multicouche		Etudes Particulières [cf. Annexe E Synthèse des différentes méthodes de $g(z)$]	d_{max} calculé (Rayleigh simplifié, Madera)	Déduit des déplacements calculés à chaque interface de couche



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

B - METHODE FORFAITAIRE

L'EC8 propose un calcul du **déplacement au niveau du sol** « d_g » qui correspond à la déformée en champ libre maximale qui va du substratum sismique jusqu'à la surface.

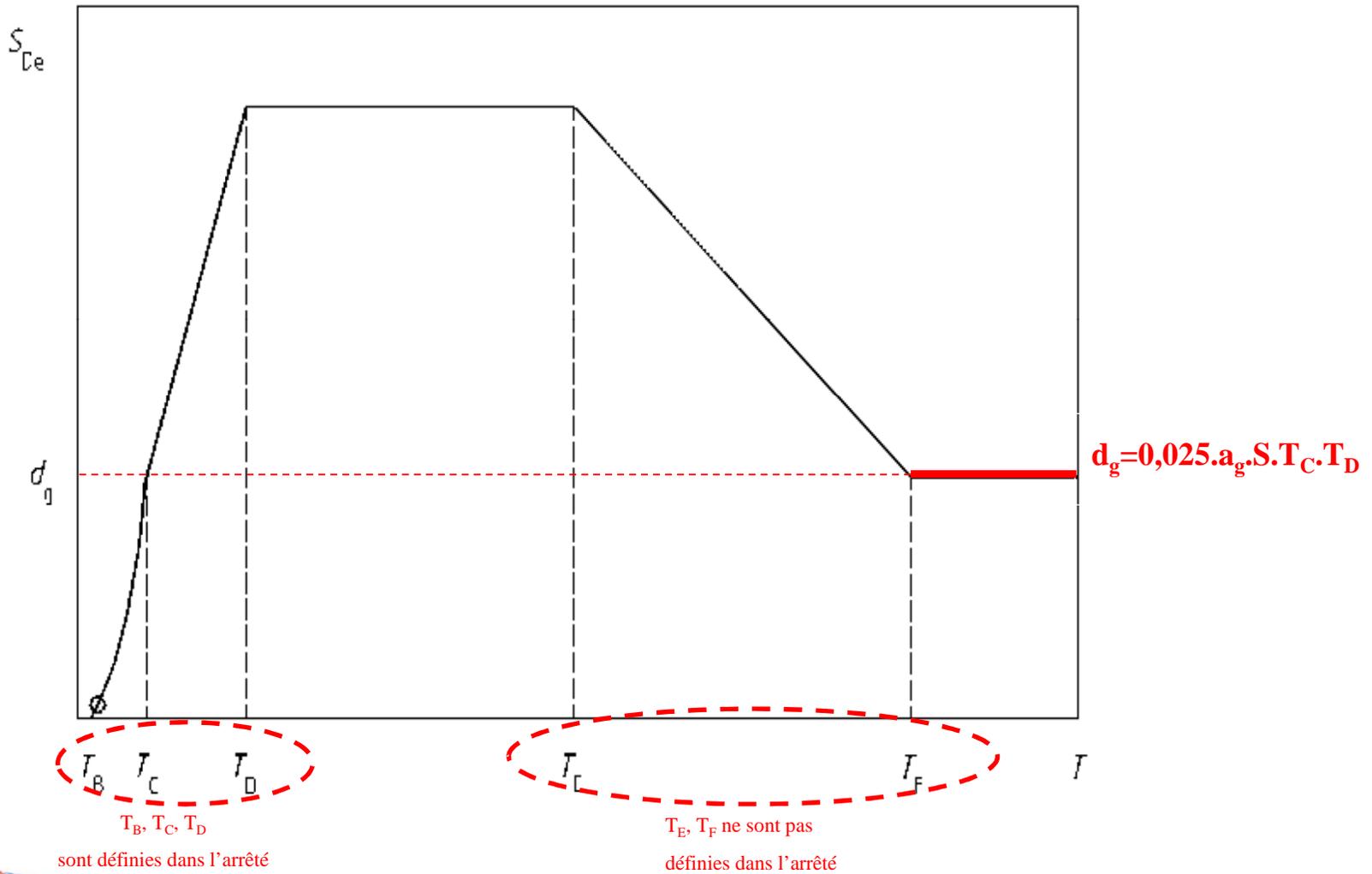
$$d_g = 0,025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D$$

Période $T(s)$	$S_e(T)$	$S_{De}(T) = S_e(T) \cdot [T/(2\pi)]^2$
$T = 0$ (PGA)	$a_g \cdot S$	/
$0 \leq T \leq T_B$	$a_g \cdot S \cdot [1 + T/T_B \cdot (2,5 - 1)]$	$0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot [1 + T/T_B \cdot (2,5 - 1)] \cdot T^2$
$T_B \leq T \leq T_C$	$a_g \cdot S \cdot 2,5$	$0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot 2,5 \cdot T^2$
$T_C \leq T \leq T_D$	$a_g \cdot S \cdot 2,5 \cdot T_C / T$	$0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot 2,5 \cdot T_C \cdot T$
$T_D \leq T \leq T_E$	$a_g \cdot S \cdot 2,5 \cdot T_C \cdot T_D / T^2$	$0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot 2,5 \cdot T_C \cdot T_D = 2,5 \cdot d_g$
$T_E \leq T \leq T_F$	$a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D / T^2 \cdot [2,5 + (T - T_E) / (T_F - T_E)] \cdot (1 - 2,5)$	$0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \cdot [2,5 + (T - T_E) / (T_F - T_E)] \cdot (1 - 2,5)$
$T > T_F$ (PGD)	$a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D / T^2$	$0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D = d_g$



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

Spectre de réponse élastique S_{De} :



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

B - METHODE FORFAITAIRE

L'EC8-1 et l'EC8-5 ne proposent pas de méthode pour développer ensuite « $g(z)$ », nécessaire au dimensionnement des fondations profondes.

En l'absence d'une étude particulière et dans le cas d'un contexte géotechnique simple**, deux approches simplifiées peuvent être utilisées pour déterminer « $g(z)$ » à partir de « dg »*

à condition que le profil de sol soit considéré comme **homogène**.

C'est-à-dire lorsque les deux conditions suivantes sont remplies :

- la vitesse des ondes de cisaillement ne décroît pas notablement avec la profondeur ;
- les vitesses des ondes de cisaillement ne présentent pas de variations brutales

$$1/\sqrt{6} < V_{smax, i+1} / V_{smax, i} < \sqrt{6} \quad \text{avec } G_{max} = \rho \cdot V_{smax}^2$$

* *Autres méthodes non forfaitaire*

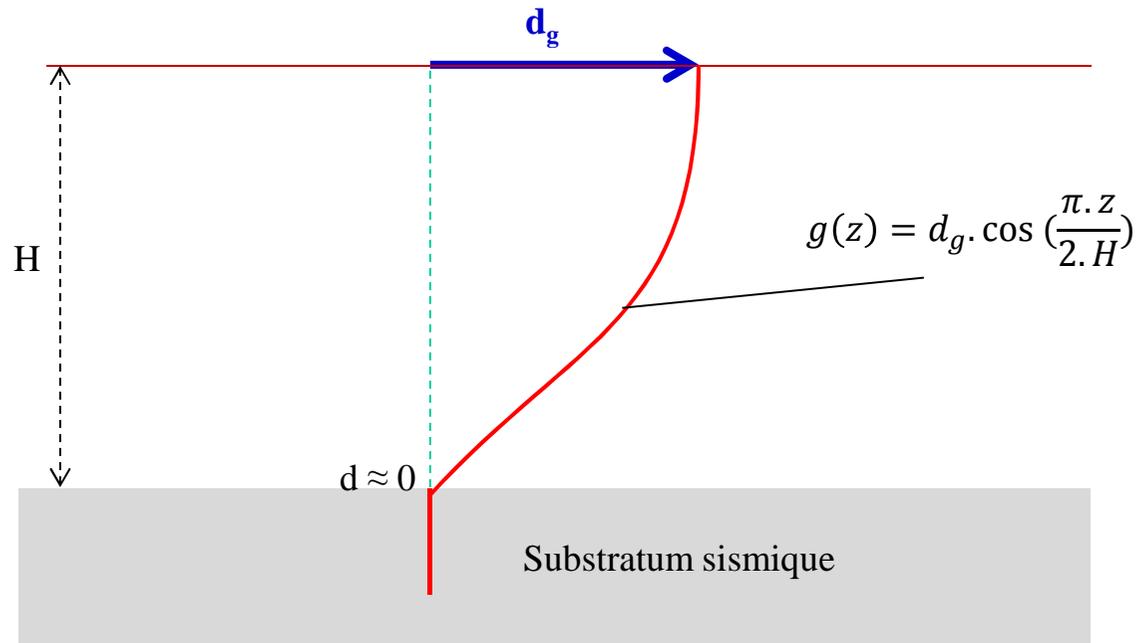
** *Contexte géotechnique simple : sol homogène (monocouche) ou simple bi-couche*



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

B - METHODE FORFAITAIRE : **Monocouche**

Le profil « $g(z)$ » du sol sur la hauteur « H » du monocouche pour une déformée en tête « d_g » est présenté ci-après :



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

B - METHODE FORFAITAIRE : **Bicouche**

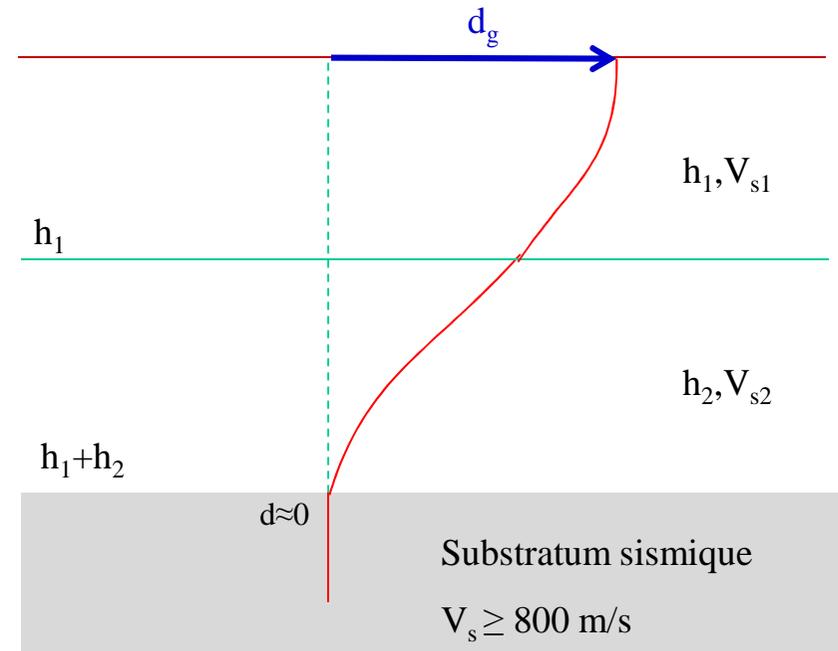
Dans le cas d'un ensemble de deux couches homogènes d'épaisseur respective « h_1 » et « h_2 », la développée « $g(z)$ » **sur la hauteur de la première couche « h_1 » est identique à la méthode du monocouche**. Au-delà, une autre fonction est proposée (d'après A. Pecker) :

pour $z \leq h_1$:

$$g(z) = d_g \cos\left(\frac{\omega z}{V_{s1}}\right)$$

pour $h_2 < z \leq h_1 + h_2$:

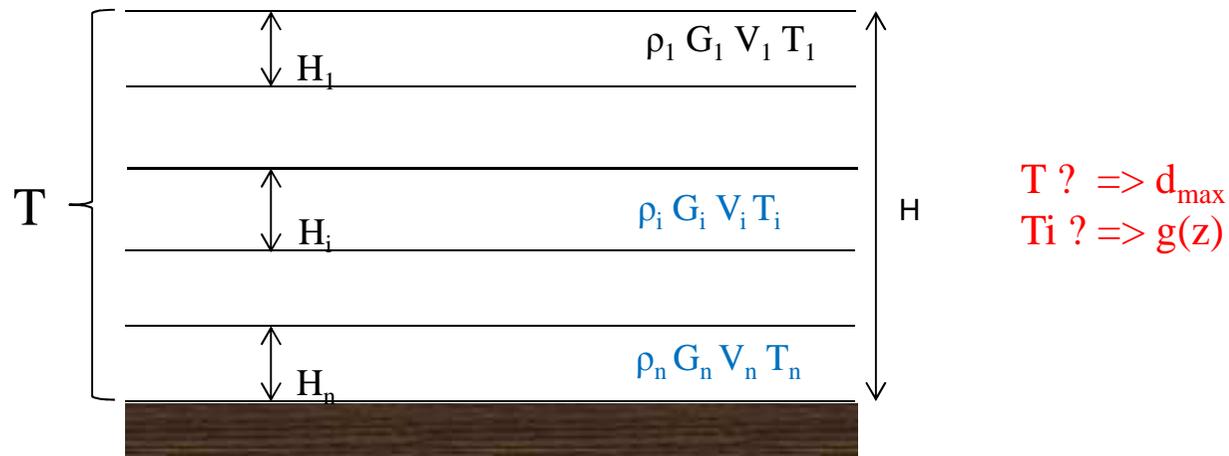
$$g(z) = d_g \frac{\cos\left(\frac{\omega \cdot h_1}{V_{s1}}\right)}{\sin\left(\frac{\omega \cdot h_2}{V_{s2}}\right)} \sin\left(\frac{\omega(h_1 + h_2 - z)}{V_{s2}}\right)$$



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

C - ETUDES PARTICULIERES : **Monocouche ou multicouche**

Un profil de sol multicouche est constitué d'un ensemble de couches homogènes.



La déformation maximale « d_{max} » est calculée à partir de la relation suivante :

$$d_{max} = \frac{T^2 \cdot a_{max}}{4 \cdot \pi^2}$$

- a_{max} : accélération de calcul définie par $a_g = a_{gr} \cdot \gamma_I \cdot S$
- a_{gr} : accélération pour un sol de rocheux (classe A),
- γ_I : coefficient d'importance du bâtiment,
- S : paramètre de sol.

T : Période équivalente du premier mode de vibration du profil de sol multicouche.



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

C - ETUDES PARTICULIERES : **Monocouche ou multicouche**

Période de vibration du mode fondamental « T_i » donnée par la formule suivante :

$$T_i = 4.H \sqrt{\frac{\rho}{G}}$$

Où :

ρ = masse volumique du sol ($\rho = \gamma/g$) ;

T = période du monocouche ;

G = module de cisaillement compatible avec le niveau de déformation du séisme ;

H = hauteur du monocouche.



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

C - ETUDES PARTICULIERES : **Méthode de Rayleigh simplifiée**

La période de vibration se déduit de la pulsation en appliquant la relation :

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$$

Dans la procédure de Rayleigh, l'algorithme est basé sur l'équation donnant la pulsation :

$$\omega^2 = \frac{\int_0^H \rho \cdot V^2 \cdot \left(\frac{dX}{dz}\right)^2 dz}{\int_0^H \rho \cdot X^2 \cdot dz}$$

Dans la procédure de Rayleigh **simplifiée**, l'équation se transforme donc comme suit et avec les hypothèses suivantes :

$$\omega^2 = \frac{4 \cdot \sum_1^n \left(\frac{H - z_i}{V_i}\right)^2 \cdot H_i}{\sum_1^n (X_i + X_{i+1})^2 \cdot H_i}$$

Hypothèses :

- Une **densité constante avec la profondeur**,
- Une **variation linéaire de la déformée entre les points extrêmes d'une même couche**,
- La variable dX/dz est remplacée par des valeurs moyennes dans chaque couche :

$$dX/dz = [H - z_i] / V_i^2$$



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE g(z)

C- ETUDES PARTICULIERES : **Méthode de Madera**

La méthode consiste à déterminer la période équivalente du premier mode de vibration du profil multicouche pour apprécier le déplacement relatif au niveau du sol, et à évaluer la forme de la déformée du profil correspondant à ce mode fondamental.

La détermination de la période équivalente d'un profil multicouche est calculée à partir de l'application successive de la méthode du bi-couche.

L'équation de référence donnant la période fondamentale de vibration « T » du bi-couche :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{H_2}{H_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} = \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_1}{T}\right) \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_2}{T}\right)$$

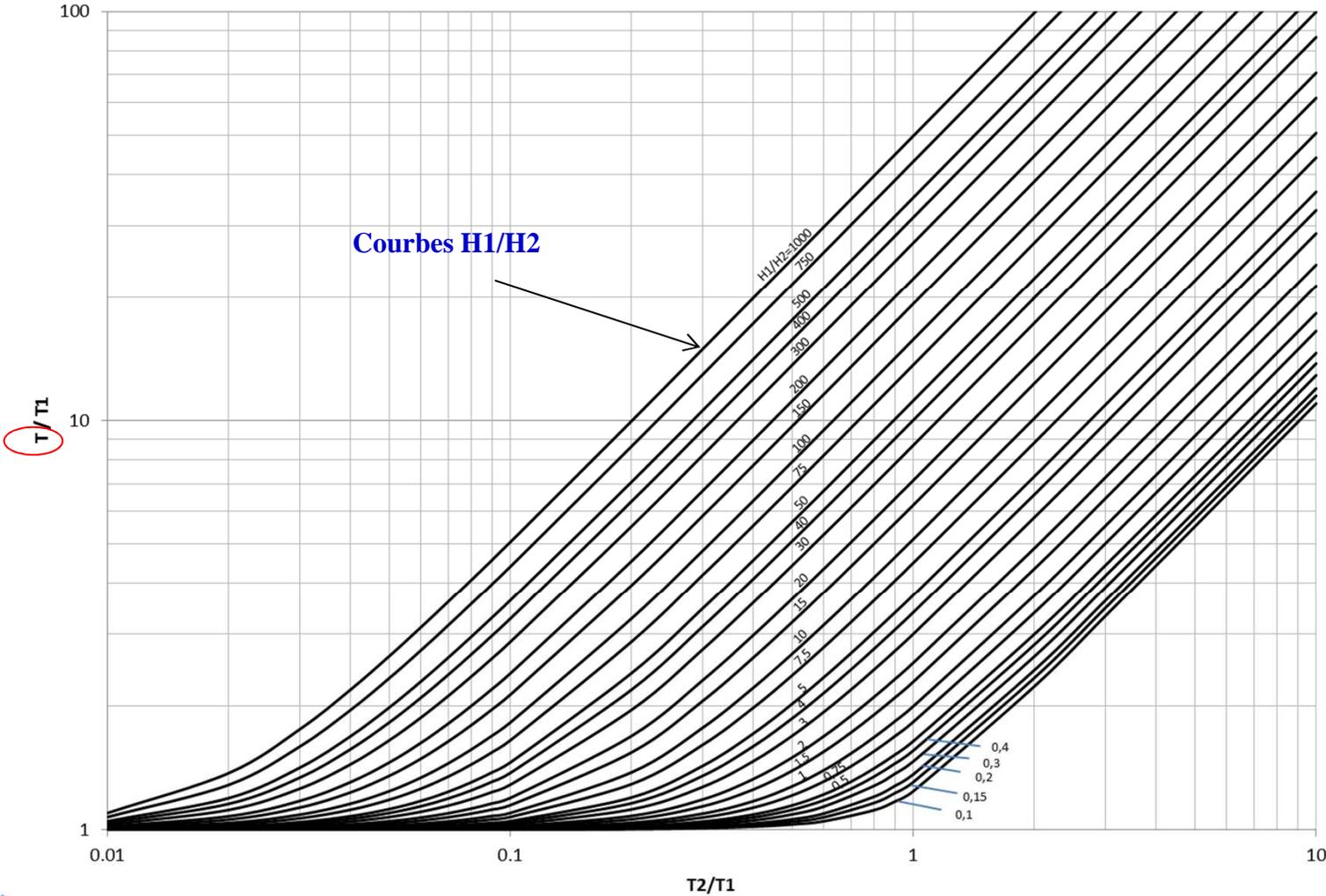
T est l'inconnu

Un abaque est présenté dans le guide pour aider à résoudre l'équation lorsque $\rho_2 \approx \rho_1$



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE g(z)

C - ETUDES PARTICULIERES : Méthode de Madera



3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

C - ETUDES PARTICULIERES : Méthode de Madera

La période équivalente T des trois premières couches sera obtenue en combinant la couche de rang 3 avec la couche équivalente aux deux premières couches, l'équation de référence se transformant comme suit après pondération des densités par les hauteurs correspondantes :

$$\frac{\rho_3 H_3}{\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2} \cdot \frac{T_2^*}{T_3} = \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_2^*}{T}\right) \times \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_3}{T}\right)$$

On procédera par récurrence jusqu'à la dernière couche qui, combinée avec les (n-1) couches précédentes, donne la période équivalente T des n couches, par résolution de l'équation suivante :

$$\frac{\rho_n H_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \rho_i H_i} \cdot \frac{T_{n-1}^*}{T_n} = \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_{n-1}^*}{T}\right) \times \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_n}{T}\right)$$

T_i^* désigne la période équivalente des i premières couches.

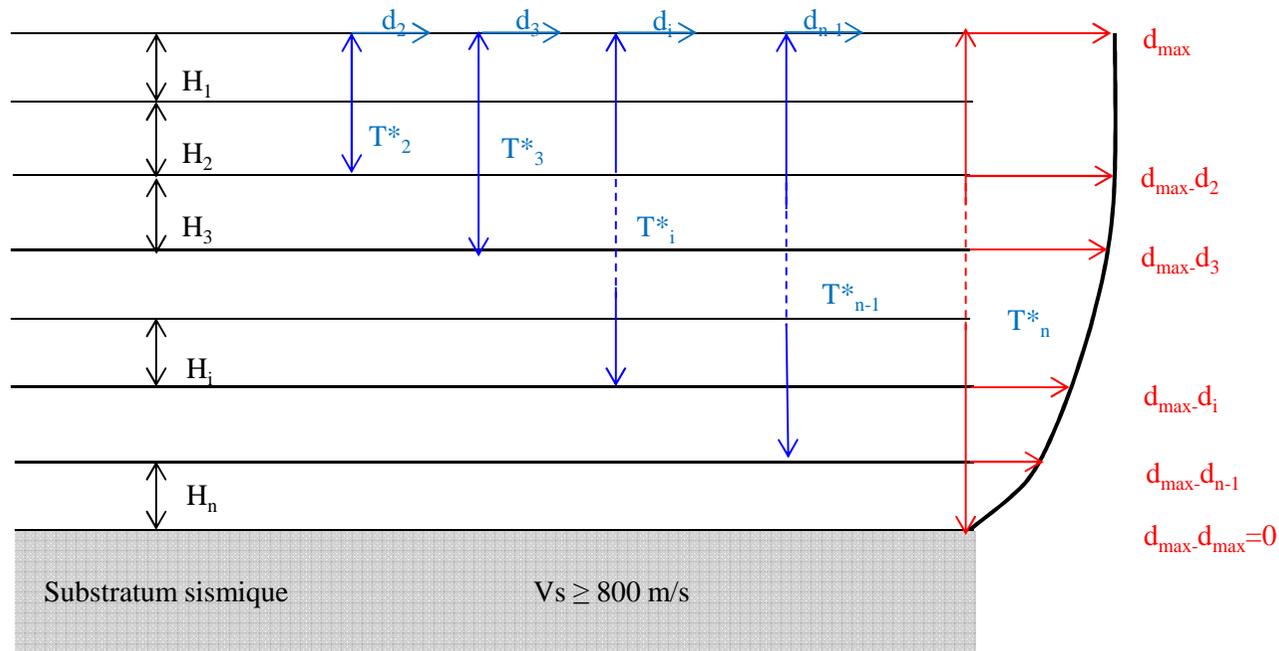


3. LA DEFORMATION EN CHAMP LIBRE $g(z)$

C - ETUDES PARTICULIERES : Méthode de Madera

La déformée maximale du sol en surface : $d_{max} = \frac{T_n^2 a_{max}}{4.\pi^2}$ T_n = période du multicouche ;

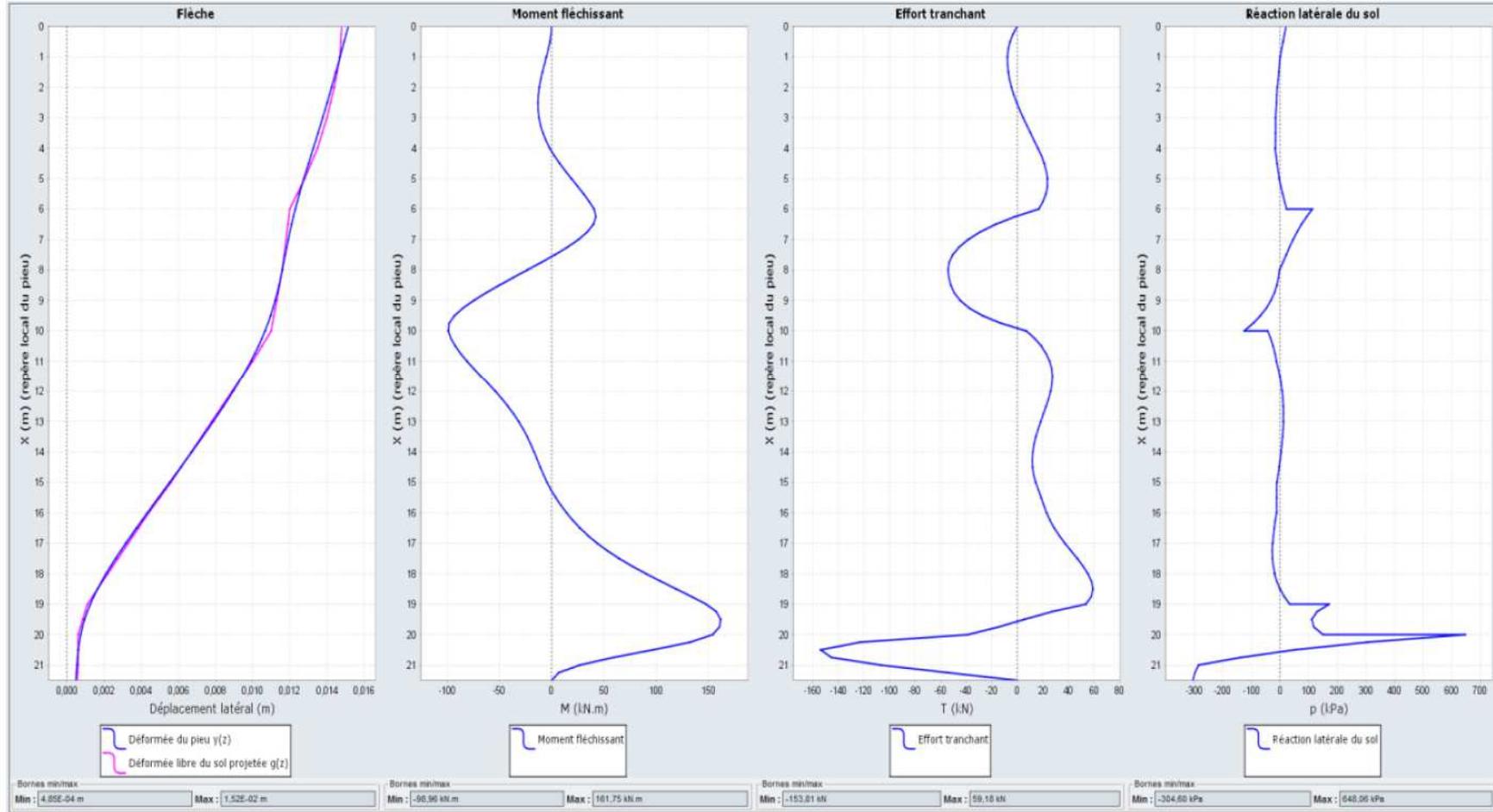
Pour i couches de sol, la déformée « d_i » : $d_i = \frac{T_i^2 . a_{max}}{4.\pi^2}$ T_i = période des i couches considérées jusqu'à la surface



4. EXEMPLE DE CALCUL D'EFFETS CINEMATiques SOUS $g(z)$

Moment et tranchant nul

Pieu libre en tête

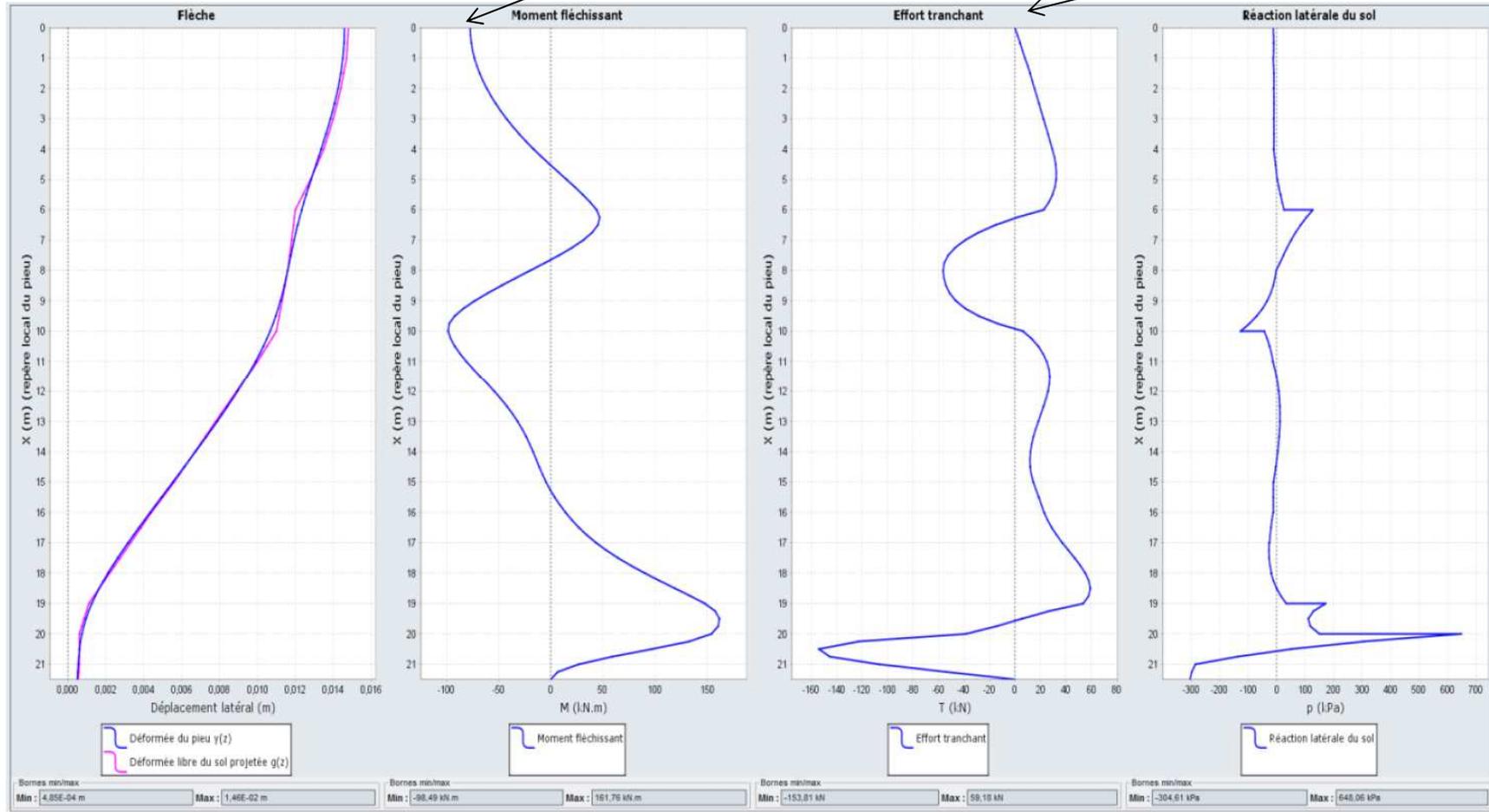


4. EXEMPLE DE CALCUL D'EFFETS CINEMATiques SOUS $g(z)$

Moment $\neq 0$

Tranchant nul

Pieu encastré en tête



5. CUMUL DES EFFETS CINEMATIKUES ET INERTIELS

Le cumul des effets cinématiques et inertiels peut s'exprimer suivant 2 solutions **en fonction du rapport α de la période de la structure à celle du sol :**

$$\alpha = T_{\text{structure}} / T_g$$

Avec

$T_{\text{structure}}$: période propre fondamentale de la structure

T_g : période du sol calculée sur la hauteur moyenne des fondations.

- **la période propre de la structure est inférieure ou proche** de la période propre du sol ($\alpha \leq 1,2$). Les effets cinématiques et les effets inertiels sont en phase.

$$\Sigma = |I(z)| + |C(z)|$$

- **la période propre de la structure est plus élevée** que la période propre du sol ($\alpha > 1,2$) ; A défaut d'une analyse temporelle, on appliquera la somme quadratique des effets inertiels et cinématiques.

$$\Sigma = [I(z)^2 + C(z)^2]^{0,5}$$



LE DOCUMENT

Merci de votre attention

