

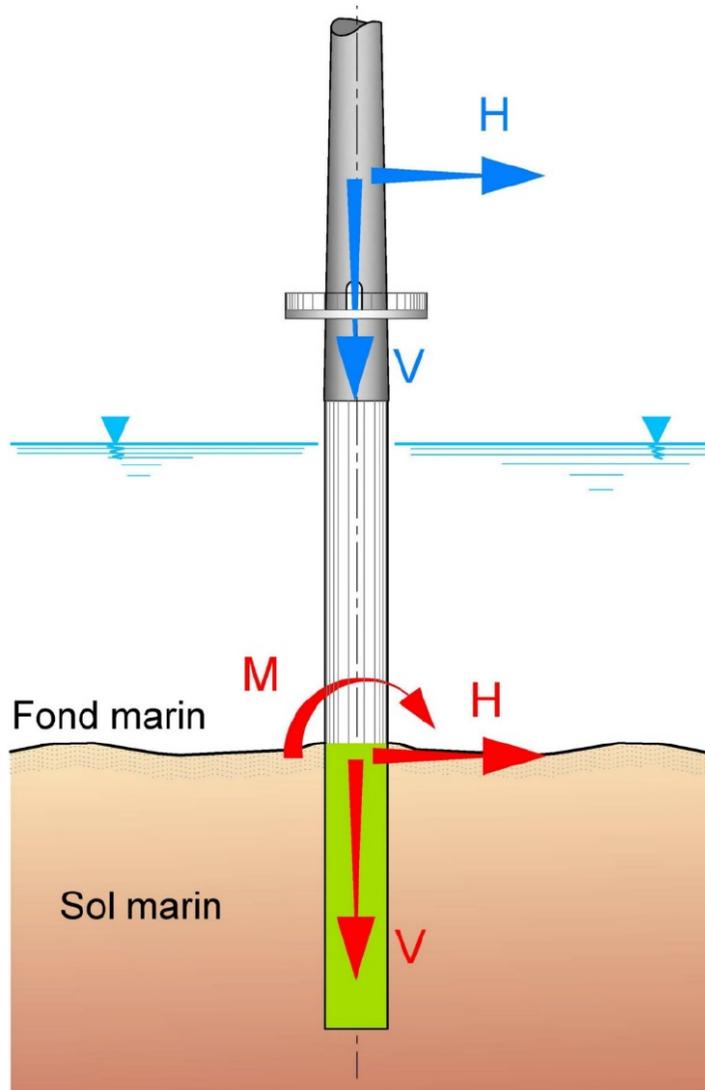
# *Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore*



## **Comportement des monopieux sous charges horizontales**

**C. JAECK**

# MONOPODES - MONOPIEUX



Un monopode est une structure cylindrique (essentiellement métallique, avec souvent une composante conique) de fort diamètre dont la partie inférieure se prolonge dans le sol.

Le monopieu est la partie enfouie d'un monopode.

Le poids ( $V$ ) étant relativement faible, **la charge horizontale et le moment de renversement sont généralement les composantes dimensionnantes.**

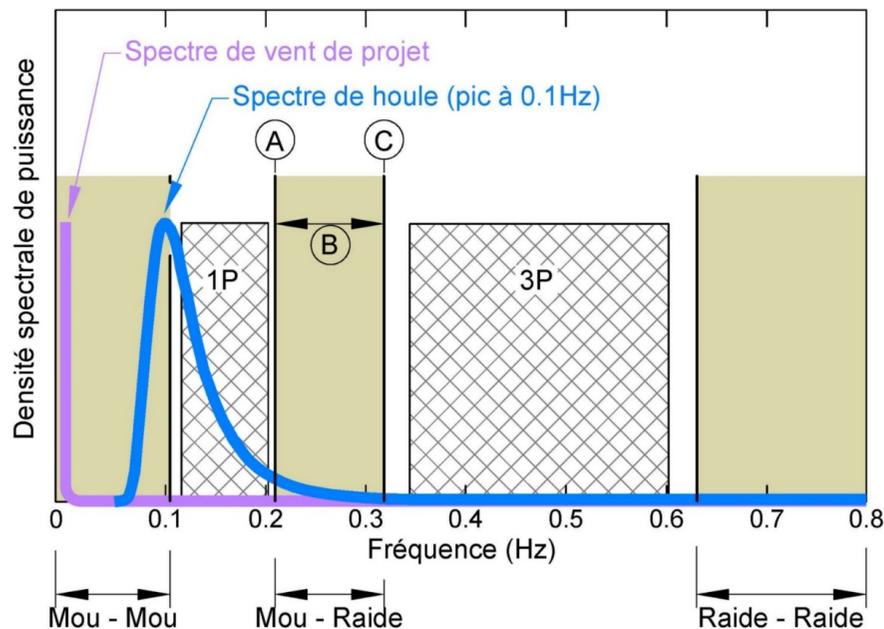
# FONDATIIONS SUR MONOPIEUX : HISTORIQUE

Les monopieux représentent le type de fondations le plus largement répandu pour les éoliennes installées en mer en Europe, du fait de leur **relative simplicité de conception, donc de leur coût compétitif et de la disponibilité de capacité de production en Europe.**

Les diamètres des monopieux, initialement compris entre 3m et 5m, sont maintenant communément de **6m à 9m** (installés le plus souvent à l'aide de marteaux hydrauliques dans la gamme 2000-4000kJ).

Le développement des processus et capacité de production permettent d'envisager la fabrication de monopieux de diamètres encore plus importants, allant jusqu'à 10m voire au-delà. ***Mais le poids élevé (associé à l'augmentation des puissances des turbines et profondeurs d'eau) deviendra l'aspect limitant pour l'installation.***

# DIMENSIONNEMENT DE MONOPIEUX : POINTS CLE



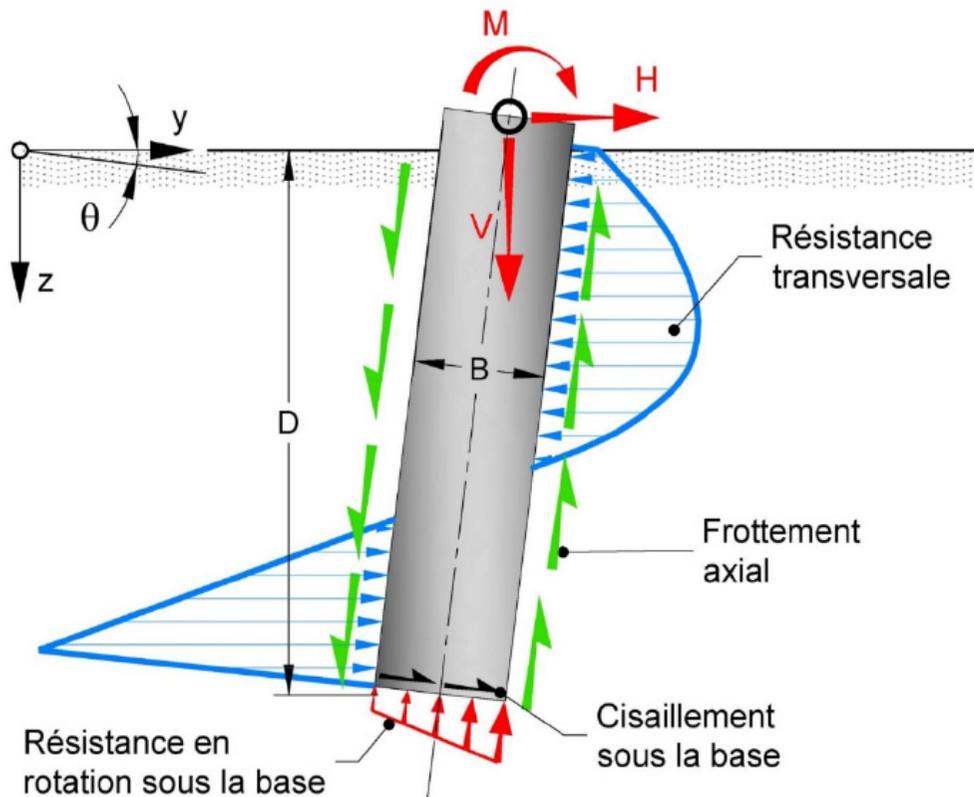
- Ⓐ Meilleur dimensionnement possible en cas de risque d'écroûssage du sol (accroissement de raideur)
- Ⓑ Meilleur dimensionnement possible en cas d'incertitude sur le comportement du sol à long terme
- Ⓒ Meilleur dimensionnement possible en cas de risque de ramollissement du sol (perte de raideur)

L'interaction sol-structure joue un rôle prépondérant pour les monopieux  $\Rightarrow$  **les raideurs de la fondation et leur évolution dans le temps doivent être maîtrisées.**

Le diamètre des monopieux est souvent déterminé par l'analyse fréquentielle (1<sup>ère</sup> fréquence propre dans la plage B).

De par l'augmentation des diamètres des monopieux et en cas d'installation dans des sols très raides, le chargement engendré par la rotation des pales 6P voire 9P peut s'avérer dimensionnant.

# COMPORTEMENT DE MONOPIEUX RIGIDES



1) Les réactions en partie inférieure du monopieu apportent une contribution significative à la résistance globale.

2) Les raideurs latérale et rotationnelle seront sous-estimées si elles sont calculées à l'aide des méthodes conventionnelles pour des pieux :

➤ Diamètre sensiblement plus grand : distorsion plus faible à déplacement donné

➤ Raideur influencée par les composantes de frottement axial et de cisaillement sous la base.

# DIMENSIONNEMENT DE MONOPIEUX : PRINCIPES

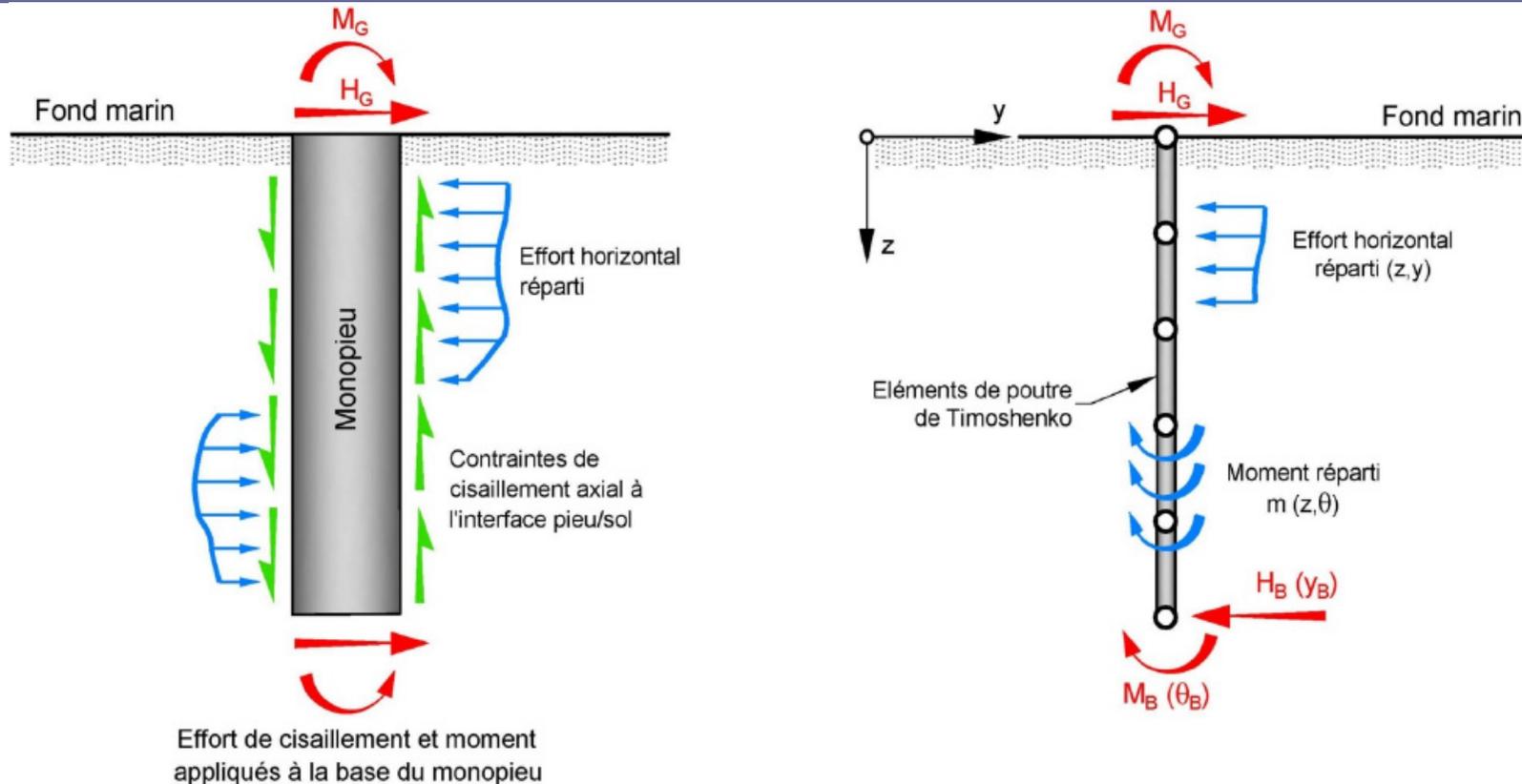
## SUR LA BASE DES POINTS PRECEDENTS :

➤ La modélisation d'un monopieu sous chargement transversal devra prendre en compte les mécanismes réels.

**Conséquence** : l'analyse d'une poutre sur appuis élasto-plastiques où la réponse du sol est modélisée sous forme de **courbes p-y développées pour des pieux de plus petit diamètre et flexibles ne pourra pas être envisagée sans modifications.**

➤ Une **estimation la plus réaliste possible de la raideur du sol** (en fonction de la profondeur, du niveau de distorsion et sous accumulation de chargements cycliques) est essentielle.

# INTERACTION MONOPIEUX-SOL : PRINCIPES



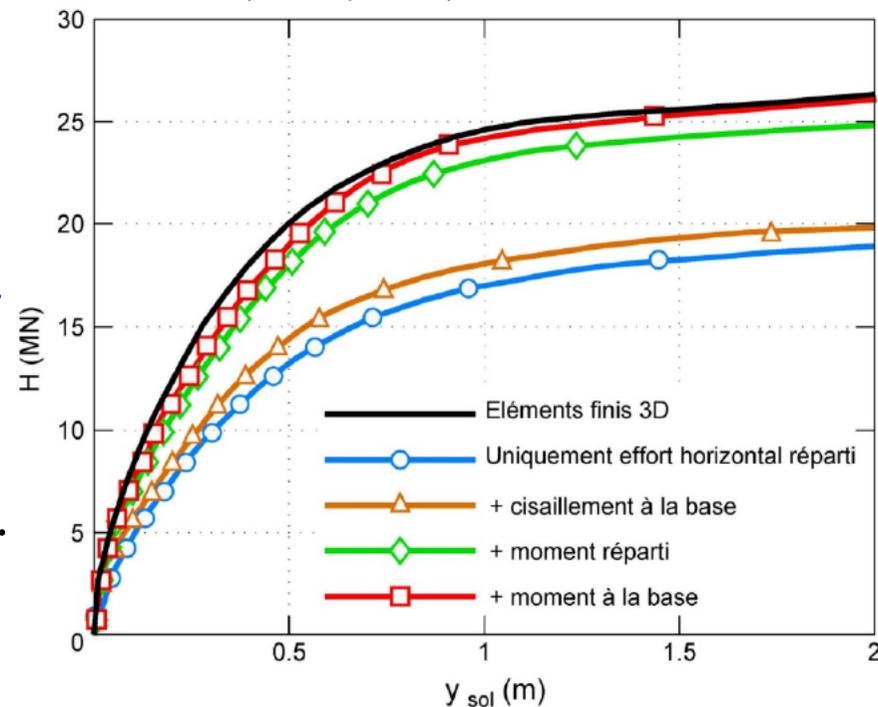
Les quatre types de résistance (effort horizontal réparti, moment réparti, cisaillement à la base du pieu, résistance rotationnelle à la base du pieu) pourront être représentés sous forme de courbes locales de réponse de sol non linéaires appliquées à une poutre élastique.

# INTERACTION MONOPIEUX-SOL

## PROJET DE RECHERCHE PISA :

- Les quatre éléments de réponses de sol précédents ont été quantifiés dans des sables denses et argiles raides et intégrés dans une méthode développée spécifiquement pour le dimensionnement de monopieux d'éoliennes.
- Les grandes lignes et la philosophie ainsi que quelques éléments de dimensionnement ont été publiés.

La contribution de l'effort horizontal réparti à la résistance transversale globale est prépondérante (au moins 70%, voire plus de 90% lorsque  $D/B > 4$ ).



# INTERACTION MONOPIEUX-SOL : RECOMMANDATIONS

## DEUX APPROCHES SUGGEREES :

➤ Réponse de sol combinant la résistance latérale répartie (courbes p-y) et la résistance de cisaillement à la base du pieu :

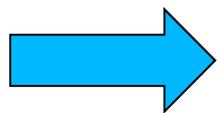
- La raideur des courbes p-y sera reliée directement à la valeur du module du sol.
- La réponse de la poutre élastique sera étalonnée pour des profils de sol représentatifs par le moyen de calculs par éléments finis dans lesquels le comportement des sols sous faibles déformations est correctement pris en compte, particulièrement si le cisaillement axial le long du fût n'est pas modélisé par ailleurs.

➤ Méthode intégrée PISA.

 Dans les sols non conventionnels, la réalisation d'essais de chargement latéral pour lesquels la méthode d'installation réelle sera reproduite pourra s'avérer nécessaire.

# CHARGEMENTS CYCLIQUES DE MONOPIEUX

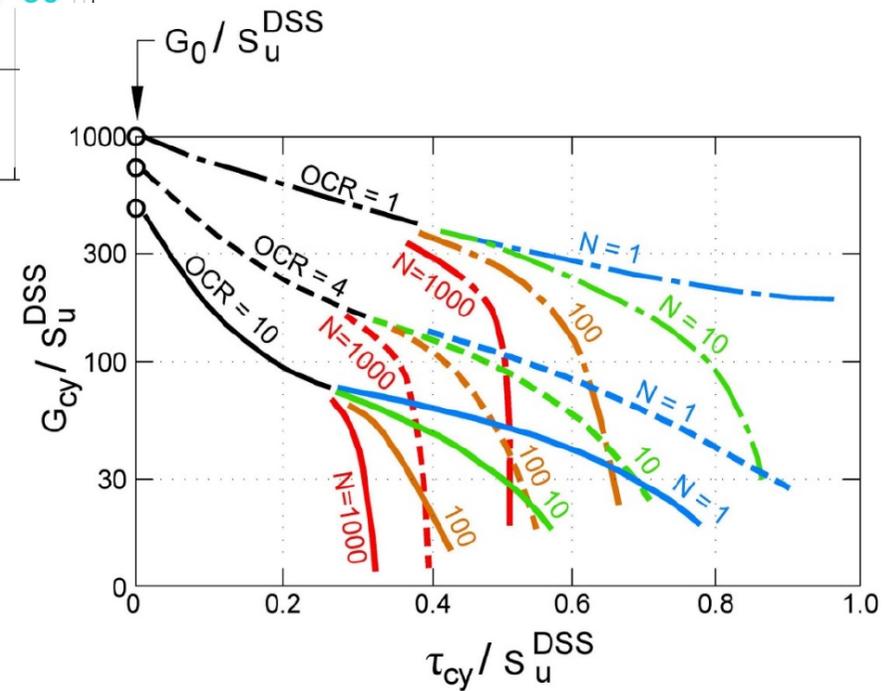
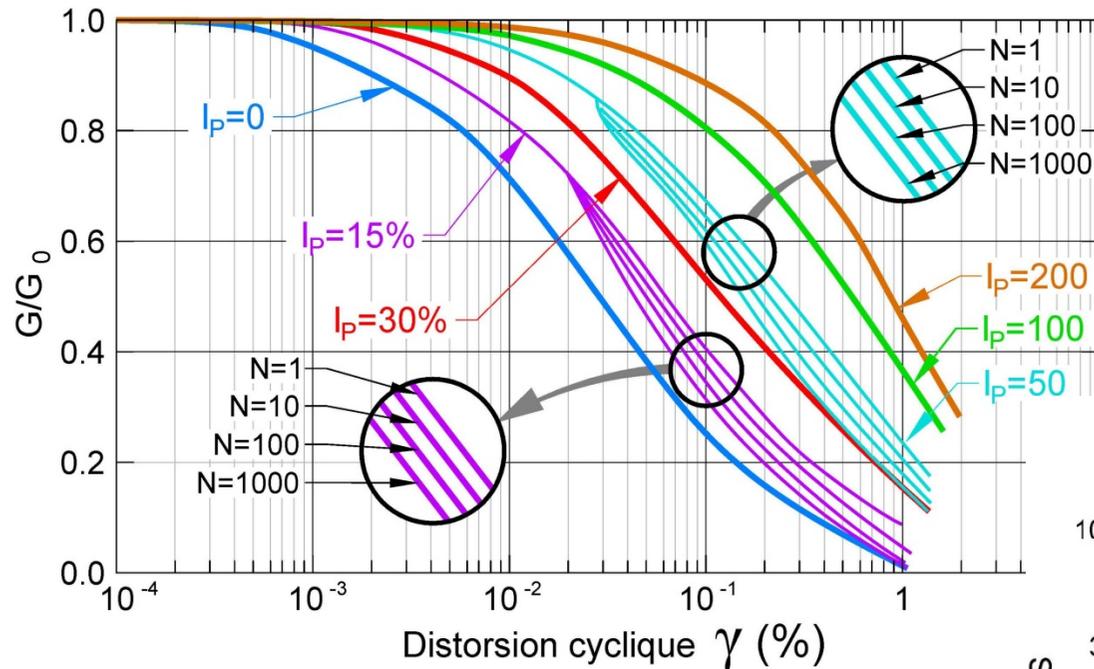
- **ELF** : l'accumulation des cycles pourra influencer la valeur des **modules de déformation**, donc les **fréquences propres**.
- **ELS** : l'accumulation de cycles va générer une **accumulation des déplacements permanents** et une modification des modules de déformation ⇒ **Fiche du monopieu doit être suffisante**



## ELF et ELS COMPORTEMENT A LONG TERME

- **ELU** : l'accumulation de pressions interstitielles et/ou de déformations peut générer une **dégradation de la résistance** du sol. **Mais un monopieu satisfaisant aux critères ELF et ELS aura le plus souvent une résistance ultime suffisante.**

# « DEGRADATION CYCLIQUE » DE LA RAIDEUR DU SOL

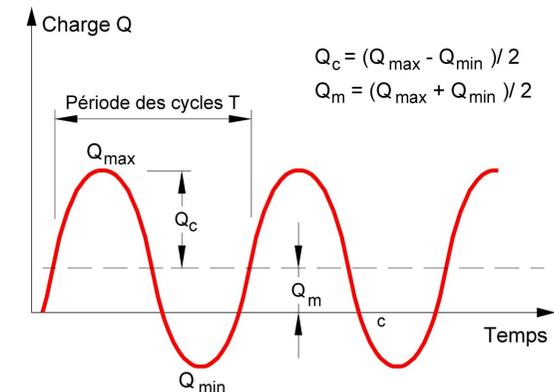


En deçà d'un certain niveau de distorsion cyclique (0.02-0.03%) ou de contrainte de cisaillement cyclique  $\Rightarrow$  pas de dégradation « cyclique » de la raideur du sol.

# ACCUMULATION DES DEPLACEMENTS - CRITERE ELS

## - Déplacement cumulé en tête :

- Fonction du chargement ( $Q_{\max}$  et  $Q_c$ )
- Loi logarithmique fonction du nombre de cycles (par ex. SOLCYP)



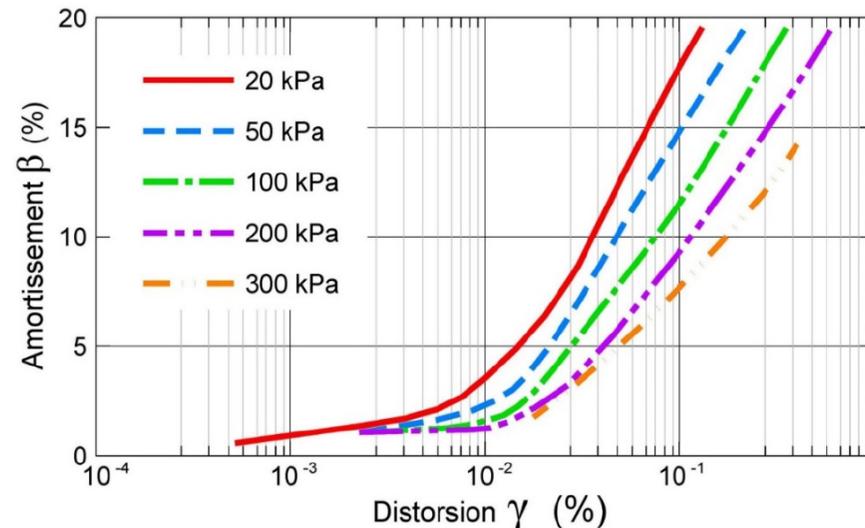
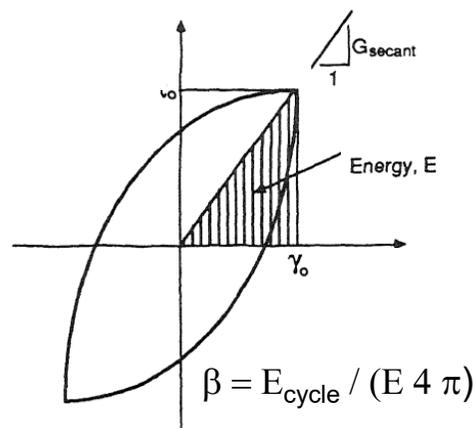
## - Etudes préliminaires : Des historiques de chargement simplifiés pourront être considérés :

- $10^7$  cycles de la charge ELF représentative **et**
- $N_{eq}$  (de l'ordre de 5 à 20) de la charge ELU sans facteur de charge (ELS rare)

## - Etudes détaillées : Des historiques réels de chargement seront utilisés. La directionnalité du chargement cyclique pourra éventuellement être prise en compte pour éviter une surestimation des déplacements calculés.

# ANALYSE DYNAMIQUE - AMORTISSEMENT

- Sous-estimer l'amortissement du sol revient à surestimer les charges de projets.
- Amortissement du sol dû :
  - A la réponse visco-élastique du sol (hystérétique) et



- Dans les sables : à l'interaction entre le sol et l'eau  $\Rightarrow$  **effet mesurable sous faibles fréquences et dans des sols très perméables** (sable moyen et fréquences  $< 0.1$  Hz ou gravier/sable grossier et fréquences  $< 1$  Hz)

Merci de votre attention

