



## Lois de comportement des matériaux granulaires : caractéristiques et implémentation dans MFront

V. Alves Fernandes  
EDF R&D AMA

✉ [vinicius.alves-fernandes@edf.fr](mailto:vinicius.alves-fernandes@edf.fr)

Club U MFront, EDF Lab Paris-Saclay

20 mai 2016



# Sommaire

- ① Caractéristiques du comportement mécanique des matériaux granulaires secs ou saturés
- ② Modèle d'Iwan pour le comportement cyclique déviatorique de matériaux granulaires
- ③ Cas d'application du modèle d'Iwan

# Elasticité

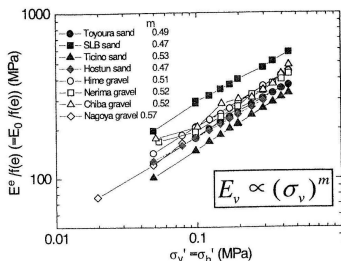
- Très faible domaine d'élasticité ( $\approx 10^{-6}$ )
- Forte dépendance à la pression moyenne  $p'$   
 -> mise en évidence par un arrangement des sphères élastiques (contact de Hertz)

$$K = \frac{\delta p'}{\delta \varepsilon_v} = \frac{3}{2} \left( \frac{4}{3} \frac{E_g}{1 - \mu_g} \frac{1}{g(e)} \right)^{2/3} p'^{1/3} \quad (1)$$

# Elasticité

- Très faible domaine d'élasticité ( $\approx 10^{-6}$ )
- Forte dépendance à la pression moyenne  $p'$   
 -> mise en évidence par un arrangement des sphères élastiques (contact de Hertz)

$$K = \frac{\delta p'}{\delta \varepsilon_v} = \frac{3}{2} \left( \frac{4}{3} \frac{E_g}{1 - \mu_g} \frac{1}{g(e)} \right)^{2/3} p'^{1/3} \quad (1)$$



# Elasticité

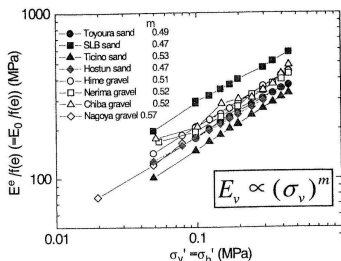
- Très faible domaine d'élasticité ( $\approx 10^{-6}$ )
- Forte dépendance à la pression moyenne  $p'$   
 -> mise en évidence par un arrangement des sphères élastiques (contact de Hertz)

$$K = \frac{\delta p'}{\delta \varepsilon_v} = \frac{3}{2} \left( \frac{4}{3} \frac{E_g}{1 - \mu_g} \frac{1}{g(e)} \right)^{2/3} p'^{1/3} \quad (1)$$

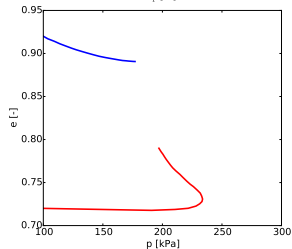
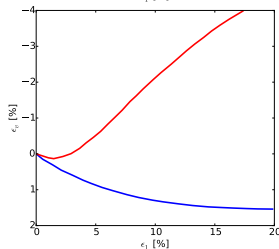
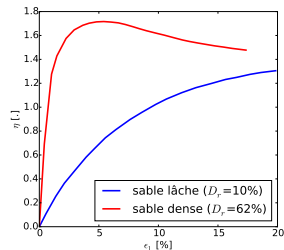
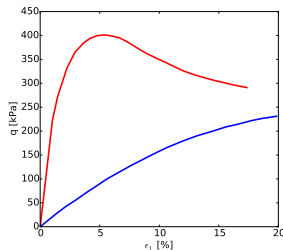
De ce fait, plusieurs auteurs privilégient des lois hypoélastiques de type :

$$K(p') = K_{ref} \left( \frac{p'}{p_{ref}} \right)^n \quad (2)$$

obs : du fait de la non admissibilité thermodynamique, cet aspect ne peut pas être implémenté dans MFront ( $n=0$ )



# Comportement monotone : essai triaxial drainé

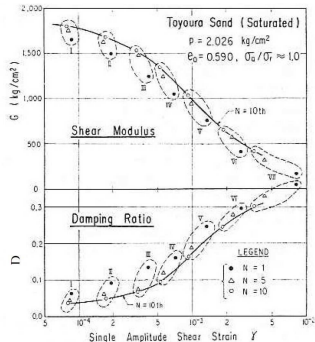
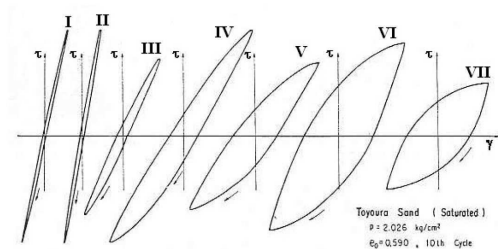


Luong (1980)

$$p' = tr(\underline{\underline{\sigma'}})$$

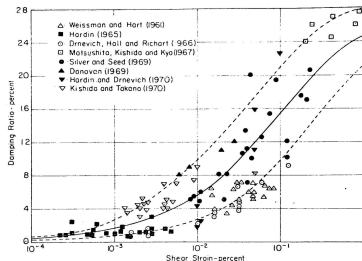
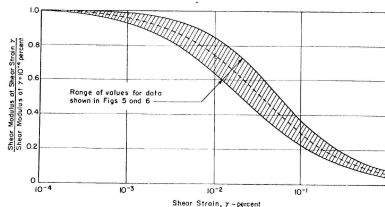
$$q = \sqrt{3/2 J_2}$$

# Comportement cyclique déviatorique

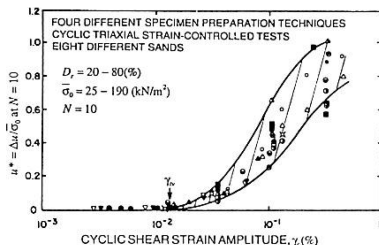


Iwasaki et al.(1978)

# Comportement cyclique déviatorique



Seed et Idriss (1970)



Dobry et al. (1982)



# Principales caractéristiques des lois de comportement mécanique de matériaux granulaires

- Lois de type élastoplastique ou viscoélastoplastique avec écoulement volumique plastique non associé, par exemple :

$$\dot{\epsilon}_v^p = \sin \psi + \frac{q}{p'}$$

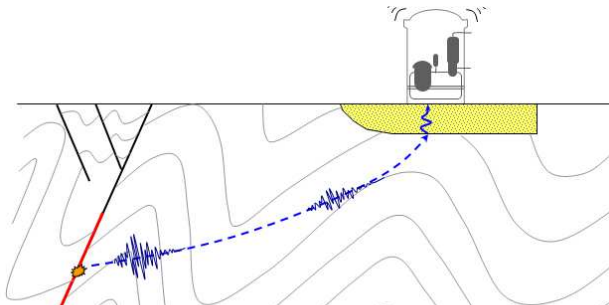
- Prise en compte de l'orthotropie des milieux naturels ou compactés (i.e. ouvrages en remblai)
- Besoin des approches de régularisation pour le comportement statique (car comportement potentiellement adoucissant)
- Calibration de paramètres dépend d'un large panel d'essais et d'auscultation. *in situ*

# Sommaire

- ① Caractéristiques du comportement mécanique des matériaux granulaires secs ou saturés
- ② Modèle d'Iwan pour le comportement cyclique déviatorique de matériaux granulaires
- ③ Cas d'application du modèle d'Iwan

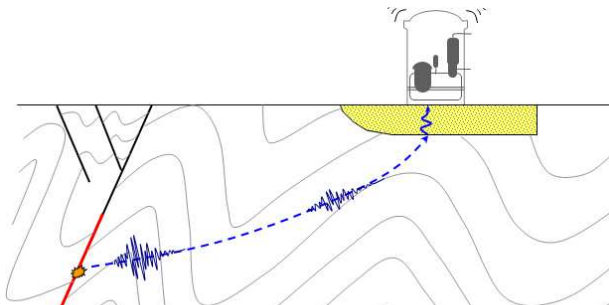
# Contexte

- Prise en compte des non linéarités du sol dans le domaine de l'interaction sol-structure pour le nucléaire  
-> démonstration des marges vis-à-vis de l'augmentation des niveaux de sismicité en France



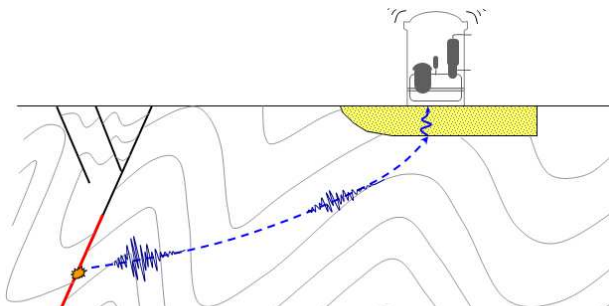
# Contexte

- Prise en compte des non linéarités du sol dans le domaine de l'interaction sol-structure pour le nucléaire  
-> démonstration des marges vis-à-vis de l'augmentation des niveaux de sismicité en France
- Proposer un modèle de complexité intermédiaire vis-à-vis de celui disponible dans Code\_Aster pour le comportement cyclique des sols (modèle de Hujeux)



# Contexte

- Prise en compte des non linéarités du sol dans le domaine de l'interaction sol-structure pour le nucléaire  
-> démonstration des marges vis-à-vis de l'augmentation des niveaux de sismicité en France
- Proposer un modèle de complexité intermédiaire vis-à-vis de celui disponible dans Code\_Aster pour le comportement cyclique des sols (modèle de Hujeux)
- Prise en main et déploiement de MFront dans le domaine de la mécanique des sols



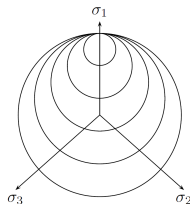
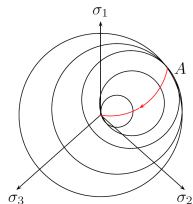
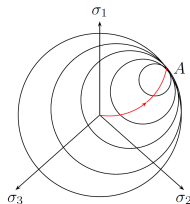
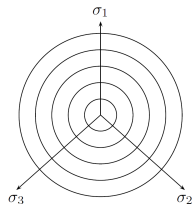
# Modèle de Iwan (1967)

Éléments clés :

- Modèle à multiples surfaces d'écrouissage cinématique linéaire
- Calibration des paramètres dépend uniquement du module  $G_{max}$  et de la courbe de dégradation ( $G/G_{max}, \gamma$ )
- Ne permet pas d'ajuster de manière indépendante l'amortissement matériau

# Modèle de Iwan (1967)

Vision schématique du modèle :



Gandomzadeh (2011)

# Modèle de Iwan (1967)

Surface de charge :

$$f_n = q_n - Y_n \quad (3)$$

avec  $q_n = \sqrt{\frac{3}{2} \left( \underline{\underline{S}} - \underline{\underline{X}}_n \right) : \left( \underline{\underline{S}} - \underline{\underline{X}}_n \right)}$  et  $Y_n$  le seuil associé au mécanisme  $n$

Une loi d'écrouissage cinématique linéaire est considérée :

$$\underline{\underline{X}}_n = C_n \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}_n^p \quad (4)$$

La loi d'écoulement est choisie de type associée :

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}_n^p = \dot{\lambda}_n \frac{\partial f_n}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} = \dot{\lambda}_n \frac{3 \left( \underline{\underline{S}} - \underline{\underline{X}}_n \right)}{2 q_n} \quad (5)$$



## Modèle de Iwan (1967)

Astuce : passage d'un système tensoriel à un système scalaire d'équations grâce à la colinéarité entre l'incrément de déformation plastique du mécanisme  $n$  et la différence  $\underline{\underline{S}} - \underline{\underline{X}}_n$  en absence de déformation plastique,  $\underline{\underline{S}}_n^e$ . Après manipulation algébrique :

$$\dot{\lambda}_n = \frac{q_n^e - Y_n}{\frac{3}{2} C_n} \quad (6)$$

avec  $q_n^e$  la norme de  $\underline{\underline{S}}_n^e$

Calcul de  $C_n$  à partir du module sécant du comportement en cisaillement pur :

$$\frac{1}{C_n} = \frac{\gamma_{k+1} - \gamma_k}{\tau_{k+1} - \tau_k} - \frac{1}{2G} - \sum_{m=1}^{k-1} \frac{1}{C_m} \quad (7)$$

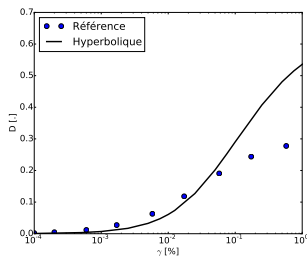
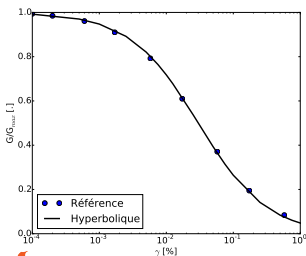
Résolution dans MFront par algorithme de Newton avec un étape de prédiction élastique (block @Predictor)

# Modèle de Iwan (1967)

## Difficultés :

- Nombre élevé de surfaces de charge  
-> Besoin de sous-découpage du pas d'intégration
- Pouvoir prescrire la courbe de comportement par l'interface  
Code\_Aster/MFront  
-> On prescrit aujourd'hui les paramètres  $\gamma_{ref}$  et  $n$  d'un modèle hyperbolique

$$\tau = \frac{G_{max}\gamma}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^n} \quad (8)$$



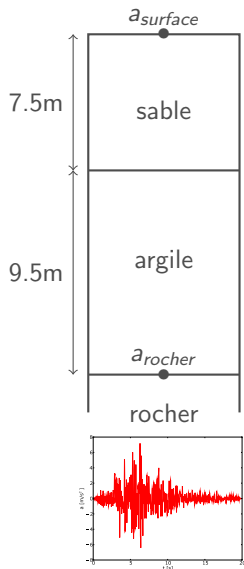
$$\gamma_{ref} = 0.03\%$$

$$n = 0.85$$

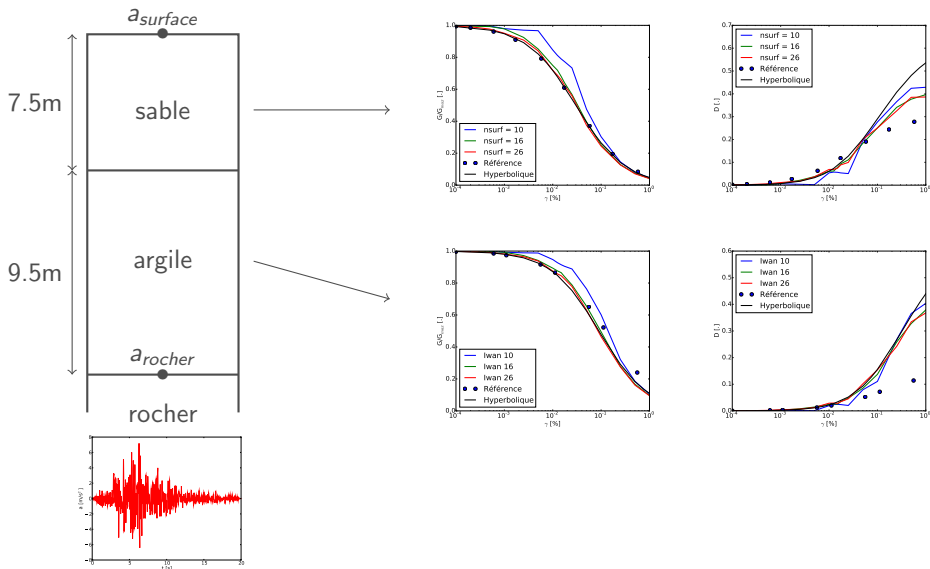
# Sommaire

- ① Caractéristiques du comportement mécanique des matériaux granulaires secs ou saturés
- ② Modèle d'Iwan pour le comportement cyclique déviatorique de matériaux granulaires
- ③ Cas d'application du modèle d'Iwan

# Calcul de la réponse d'une colonne de sol 1D

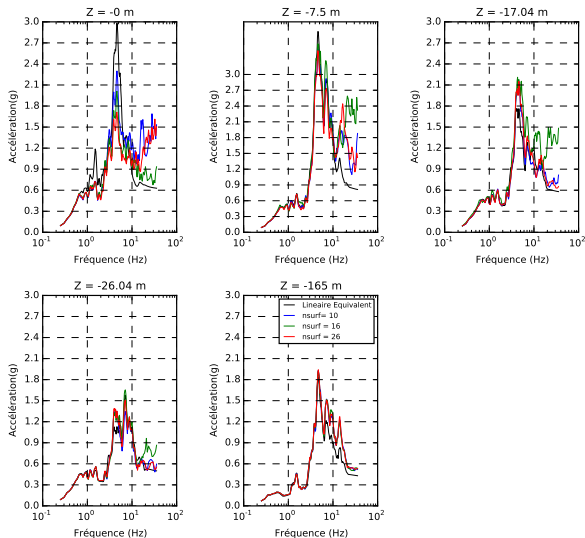


# Calcul de la réponse d'une colonne de sol 1D



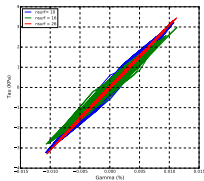
# Résultats comparatifs - FFT accélérations

## Input bedrock

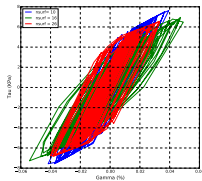


# Résultats comparatifs - contrainte-déformation (sable)

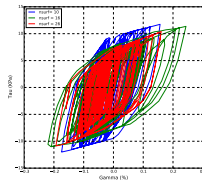
Z = 0.0 m



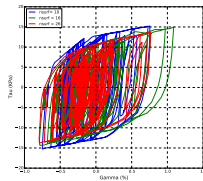
Z = 1.0 m



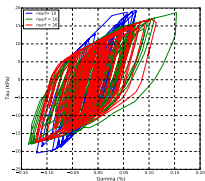
Z = 2.0 m



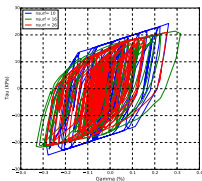
Z = 3.0 m



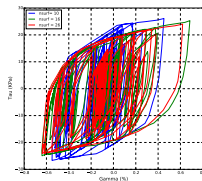
Z = 4.0 m



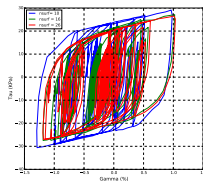
Z = 5.0 m



Z = 6.0 m

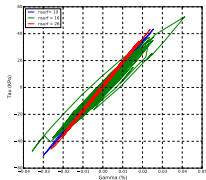


Z = 7.0 m

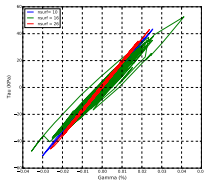


# Résultats comparatifs - contrainte-déformation (argile)

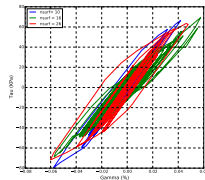
Z = 8.0 m



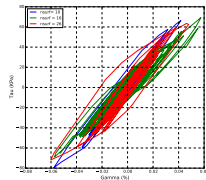
Z = 9.0 m



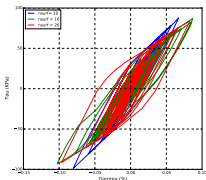
Z = 10.0 m



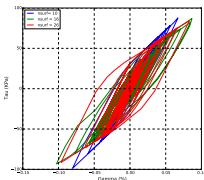
Z = 11.0 m



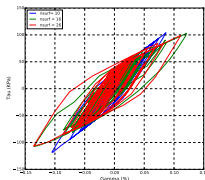
Z = 12.0 m



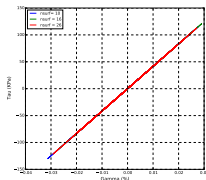
Z = 14.0 m



Z = 16.0 m



Z = 17.0 m





# Conclusions et Perspectives

## Conclusions

- Mise en place d'un modèle simple et facilement paramétrable, adapté au comportement déviatorique des sols
- Développement et maintenabilité aisés ( $\approx 200$  lignes de code pour le modèle)

# Conclusions et Perspectives

## Conclusions

- Mise en place d'un modèle simple et facilement paramétrable, adapté au comportement déviatorique des sols
- Développement et maintenabilité aisés ( $\approx 200$  lignes de code pour le modèle)

## Perspectives pour le modèle d'Iwan :

- Amélioration des conditions de convergence  
-> gestion locale du pas d'intégration (sous-découpage automatique type ITER\_INTE\_PAS non disponible)
- Pouvoir fournir directement la courbe ( $G/G_{max}, \gamma$ )

# Conclusions et Perspectives

## Conclusions

- Mise en place d'un modèle simple et facilement paramétrable, adapté au comportement déviatorique des sols
- Développement et maintenabilité aisés ( $\approx 200$  lignes de code pour le modèle)

## Perspectives pour le modèle d'Iwan :

- Amélioration des conditions de convergence  
-> gestion locale du pas d'intégration (sous-découpage automatique type ITER\_INTE\_PAS non disponible)
- Pouvoir fournir directement la courbe ( $G/G_{max}, \gamma$ )

## Perspectives pour l'utilisation des lois de mécanique de sols avec MFront :

- Disponibilité de modèles de régularisation
- Disponibilité d'un vrai couplage THM
- Adapté à des modèles multimécanismes ?

**Merci de votre attention**