



Webinaire du 10 Mai 2022 de 10h30 à 12h30

Soutènements en zone sismique – Partie II

Séance animée par :

- Fahd CUIRA
- Delphine BOUTHEON
- Gaël GOURRIN
- Gustavo PEREIRA
- Delphine LAOT et Dominique NIBEL
- Florent BOUDET et Dominique BATISTA

TERRASOL – CFMS
ERG – CFMS
SOCOTEC
SOLETANCHE BACHY
BOTTE FONDATIONS
CEREMA

Sommaire

- Murs et écrans de soutènement sous séisme

- Compléments au webinaire du 12 Avril 2022
- Exemple d'un mur gravitaire
- Exemple d'un écran en milieu urbain

F. Caira (Terrasol)

G. Gourrin (Socotec)

D. Laot (Botte Fondations)

- Les soutènements en milieu portuaire

- Les points clés à gérer
- Projet de Guide Cerema

G. Pereira (Soletanche Bachy)

F. Boudet et D. Batista (Cerema)

- Perspectives normatives

F. Caira (Terrasol)

Etude parasismique d'un écran de soutènement butonné en milieu urbain

1. Présentation du contexte
2. Questions clés sous séisme
3. Dimensionnement en première approche
4. Analyse comparative
5. Synthèse et perspectives



Présentation du contexte

1. Présentation du projet Marseille Cœur Aéroport

»» Projet Marseille Cœur Aéroport

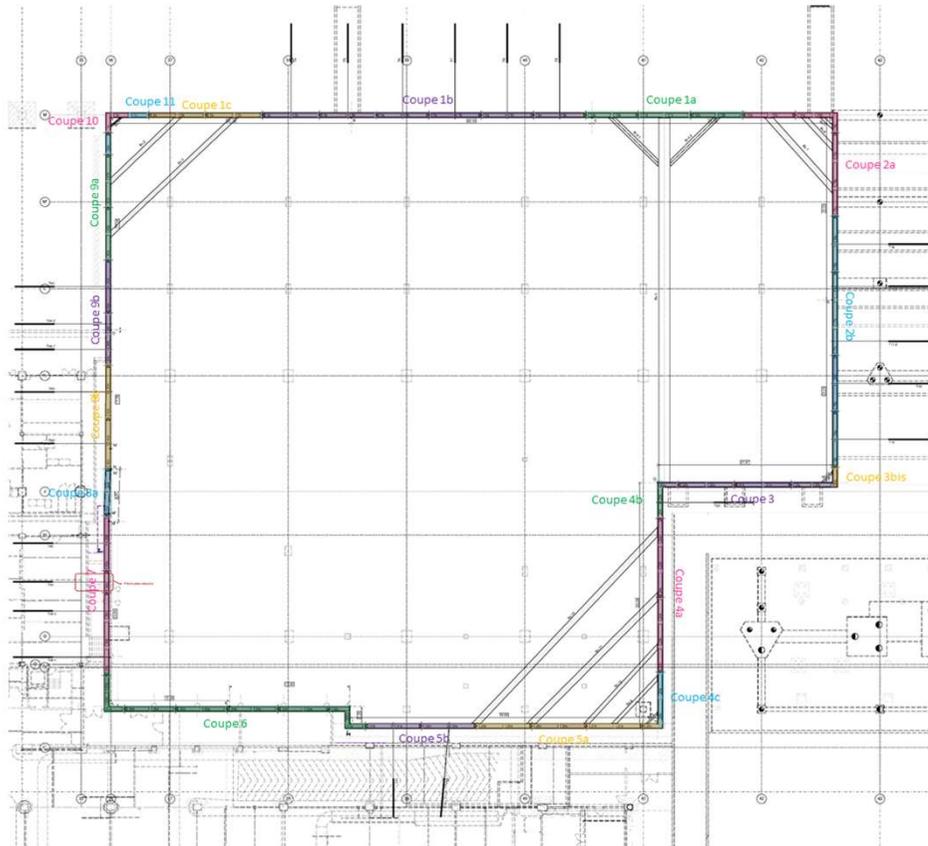


»» Acteurs du projet



- Fonction du bâtiment: Création d'un **nouveau tri bagage** compatible avec les exigences des vols internationaux pour les Jeux Olympiques de 2024
- Composition du bâtiment : **1 niveau de sous-sol** + 3 niveaux de dalles au-dessus du RDC + toiture en charpente métallique
- Intervention de Botte Fondations en phase **EXE** pour la réalisation des études des fondations et une partie des travaux de fondations

1. Caractéristiques du soutènement

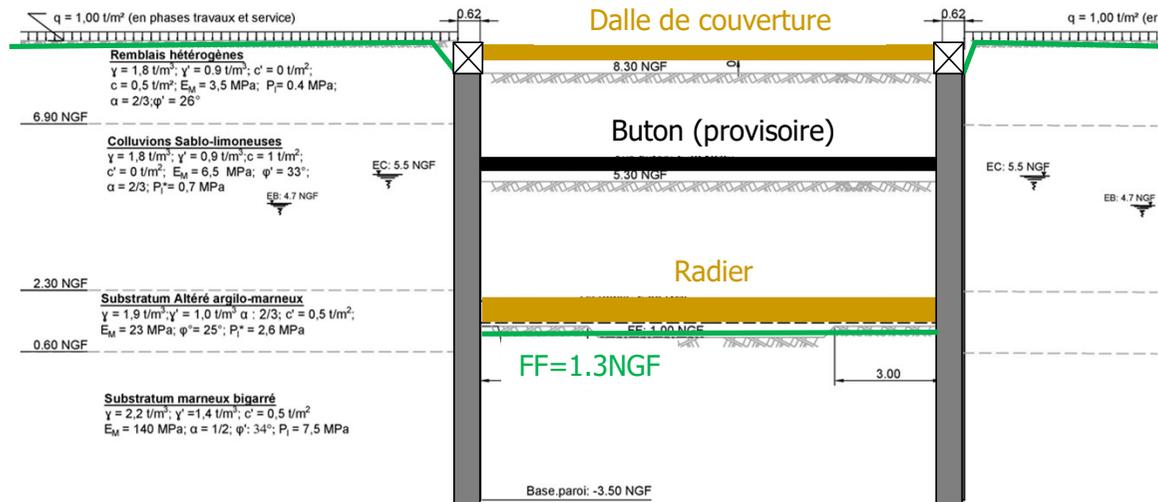


- Soutènement en **parois moulées d'épaisseur 62 cm**
- Dimensions de la fouille: **90 x 75m** environ
- Hauteur totale du soutènement : $\approx 12.5\text{m}$
- Hauteur vue du soutènement: $\approx 7.5\text{m}$
- Hauteur fichée de soutènement: $\approx 5\text{m}$

1. Caractéristiques du soutènement

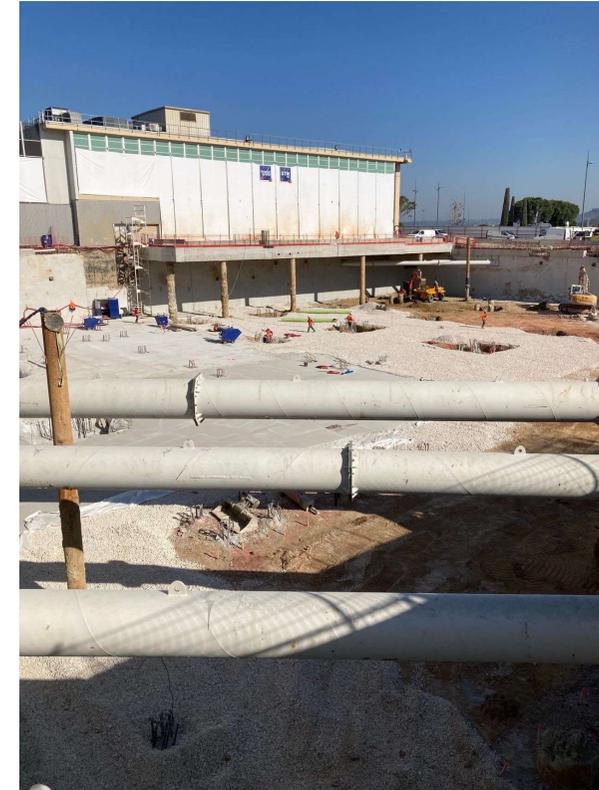
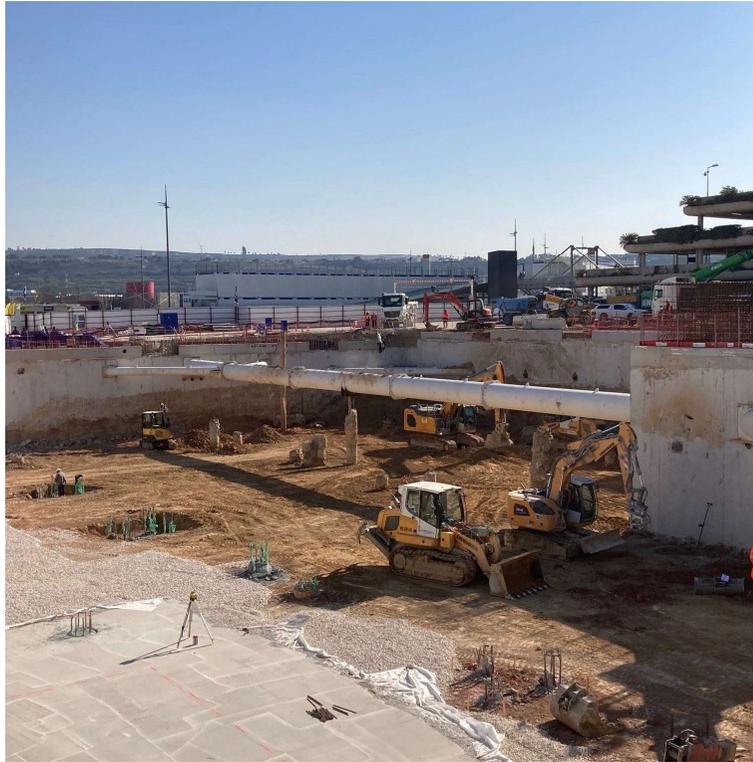
Coupe de calcul type

TN=9.2NGF



- **Appuis :**
 En phase provisoire : 1 lit de buton/tirant
 En phase définitive : Dalle de couverture + Radier
- **Surcharges:**
 En phase définitive : 1t/m²

1. Quelques photos du chantier



1. Caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques

» Caractéristiques géotechniques

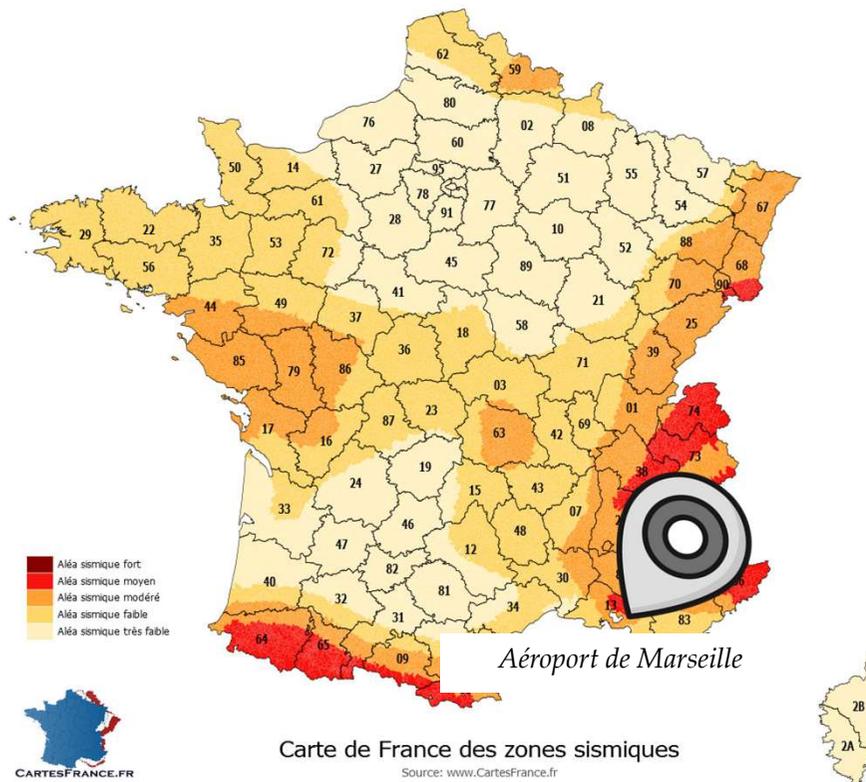
Nature des terrains	Toit de la couche (NGF)	Base de la couche (NGF)	γ (t/m ³)	γ' (t/m ³)	φ' (°)	c' (t/m ²)	δ (°)	E_M (MPa)	α_M	p_{1*} (MPa)
Remblais hétérogènes	9.2	6.9	1.8	0.9	26	0	$\varphi'/3$	3.5	2/3	0.4
Colluvions sablo-limoneuses	6.9	2.3	1.8	0.9	33	0	$2\varphi'/3$	6.5	2/3	0.7
Substratum altéré argilo-marneux	2.3	0.6	1.9	1.0	25	0.5	$\varphi'/3$	23	2/3	2.6
Substratum marneux bigarré	0.6	<-15.5	2.2	1.4	34	0.5	$2\varphi'/3$	140	1/3	7.5

» Caractéristiques hydrogéologiques

Eau Basse (EB) : 4.7 NGF (-4.5/TN)
 Eau Chantier (EC) : 5.5 NGF (-3.7/TN)
 Eau Haute (EH) : 7 NGF (-2.2/TN)
 Eau Exceptionnelle (EE) : 7.5 NGF (-1.7/TN)

Sols	Perméabilité (m/s)
Colluvions	Entre 5×10^{-6} et 8×10^{-7}
Marnes	Entre 1×10^{-8} et 3×10^{-8}

1. Caractéristiques sismiques



- Zone de sismicité **3** $\Rightarrow a_{gr} = 1.1 \text{ m.s}^{-2}$
- Catégorie d'importance de l'ouvrage: **IV**
 $\Rightarrow \gamma_I = 1.4$
- Classe de sol : **C** $\Rightarrow S = 1.35$
- Accélération de calcul :

$$a_g = \gamma_I \times a_{gr} = 1.54 \text{ m.s}^{-2}$$

2

Questions clés sous
séisme

2. Questions clés pour l'étude de la réponse sismique d'un soutènement butonné

Action sismique

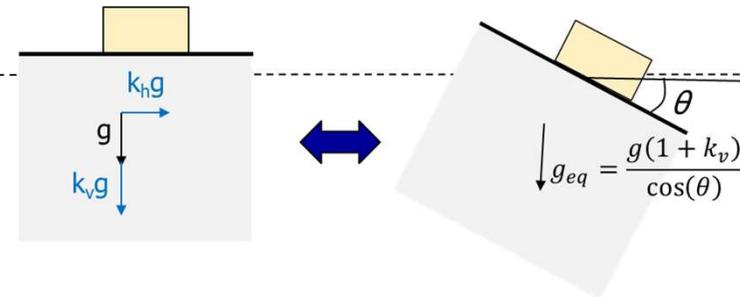
Modélisation pseudo-statique - Utilisation des coefficients sismiques:

$$k_h = \frac{a_g}{g} \times \frac{S}{r}$$

Quel r choisir?

$$k_v = \pm 0.5 k_h$$

Inclinaison sismique θ :



	Hors nappe	Sol fermé sous nappe ($k < 5 \times 10^{-4}$ m/s)	Sol ouvert sous nappe ($k > 5 \times 10^{-3}$ m/s)
ΔP_{ad}	$\tan\theta = k_H/(1+k_v)$	$\tan\theta = (\gamma/\gamma')k_H/(1+k_v)$	$\tan\theta = (\gamma_d/\gamma')k_H/(1+k_v)$

Comment définir θ , sur la hauteur du soutènement, lorsque la nappe n'est pas affleurante?

2. Questions clés pour l'étude de la réponse sismique d'un soutènement butonné

Comportement et paramètres de résistance du sol

Quel **comportement du sol**? Quels **paramètres de sol utiliser**?

D'après Webinaire CFMS du 12/04/22 et Pratique de l'interaction Sols Structure sous séisme (Stéphane Brûlé et Fadh Cuira)

Doit-on prendre en compte $c' \neq 0$

Présence de la nappe	Comportement	Type de sol (en général)	Perméabilité	Paramètres de résistance privilégiés
Non	-	-	-	c', ϕ'
Oui	Ouvert	Graves	$> 5 \times 10^{-3}$ m/s	ϕ'
	Fermé	Sols fins sous nappe (type argiles)	$< 5 \times 10^{-4}$ m/s	c_u
	Fermé apparent/ intermédiaire	Sables sous nappe	Entre 5×10^{-3} m/s et 5×10^{-4} m/s	τ_{cyc} ou Φ' et Δu

Que faire lorsque ces données ne sont pas fournies?

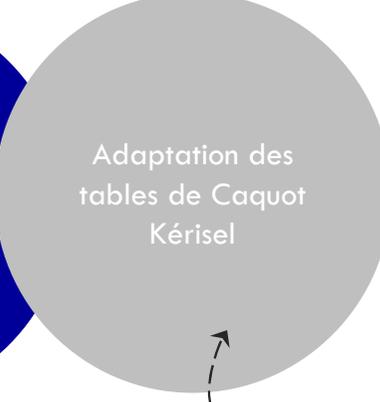
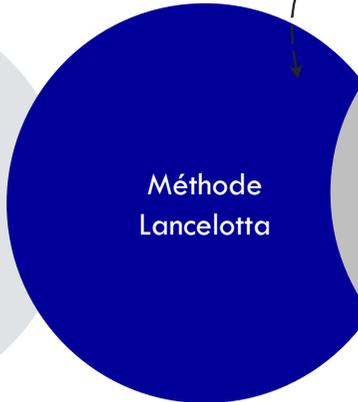
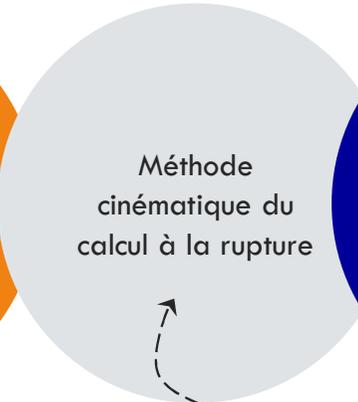
2. Questions clés pour l'étude de la réponse sismique d'un soutènement butonné

Poussée et butée dynamique des terres

Comment calculer la poussée et la butée dynamique des terres ?
cf Webinaire CFMS du 12/04/22 pour plus de détails

Méthode locale : Théorie de la plasticité - généralisation de Rankine - Approche par l'intérieur

$$\sigma_a = -2c' \sqrt{K_{AE}} + K_{AE}(\sigma_v - u) + u$$



Méthode globale: Coin de Coulomb avec introduction de forces inertielles - Approche par l'extérieur

$$P_{ad} = K_{ad} \times \left(\frac{1}{2} \gamma H^2 (1 + k_v) \right) - K_{acd} \times (cH)$$

Sabro Okabe et al, « General Theory on earth Pressure and seismic stability of retaining wall and dam », 1924

Méthode globale: Etude d'un bloc de sol, dont la frontière est représentée par un arc de spirale logarithmique - Approche par l'extérieur

O. Coussy et J. Salençon, « Analyse de la stabilité des ouvrages en terre par le calcul à la rupture, » Annales des Ponts et Chaussées, pp. 7-35, 4ème trimestre 1979

Méthode locale : Non analysée dans cette présentation

2. Questions clés pour l'étude de la réponse sismique d'un soutènement butonné

Poussée et butée dynamique des terres

Une fois que l'on sait calculer la poussée et la butée dynamique des terres, **Sur quelle hauteur** appliquer ces forces dynamiques? Et **quel point d'application** pour la poussée et la butée dynamique des terres?

Modélisation du système de soutènement (Modèle MISS-K)

- Modélisation **simple écran ou double écran?**
- Comment **appliquer l'incrément dynamique de poussée** ? Pression additionnelle sur l'écran ou modification des paliers de poussée et de butée
- Quel **raideur pour le sol? Faut-il changer EI?**
- Faut-il vraiment **réduire la butée?**
- Prise en compte de la **rugosité de la paroi**
- Comment prendre en compte les **forces d'inertie de la structure?**

Obtention des sollicitations dans la paroi

Ferraillage de la paroi



3

Dimensionnement en première approche

3. Présentation des choix effectués pour le calcul simplifié

Action sismique

Choix de r : $r=1$

$$k_h = \frac{a_g}{g} \times \frac{S}{r} = 0.235$$

$$k_v = 0.5 k_h = 0.118$$

Calcul présenté pour un séisme pesant

Choix de θ : θ variable

$$\theta = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1+k_v}\right) \text{ hors nappe} \\ \tan^{-1}\left(\frac{\gamma}{\gamma'} \times \frac{k_h}{1+k_v}\right) \text{ sous nappe} \end{cases} = \begin{cases} 11.8^\circ \text{ hors nappe} \\ 22.8^\circ \text{ sous nappe} \end{cases}$$

Comportement et paramètres de résistance du sol

Comportement **fermé** sous séisme pour les marnes et colluvions sous nappe.

En l'absence de données sur les paramètres de résistance non drainés du sol

⇒ Utilisation des paramètres c' et Φ'

3. Présentation des choix effectués pour le calcul simplifié

Poussée et butée dynamique des terres

Modélisation du système de soutènement (Modèle MISS-K)

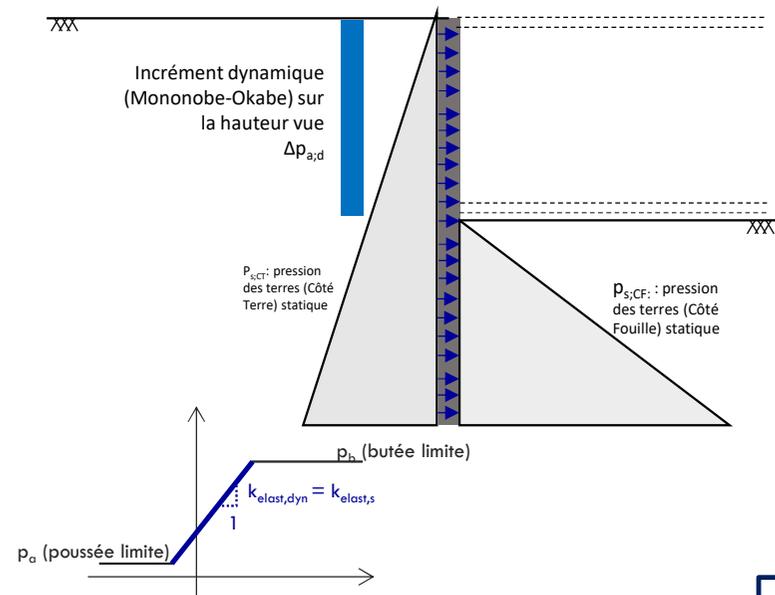
$$P_{ad} = P_{as} + \Delta P_{ad} + P_{ws} + P_{wd}$$

P_{as} : Poussée statique calculée avec c' et Φ' (Caquot Kérisel)
 ΔP_{ad} : Incrément dynamique de poussée: $\Delta P_{ad} = P_{ad}(k_h, k_v) - P_{ad}(k_h = 0, k_v = 0)$
 Calculés avec la **méthode de Mononobe - Okabe sans prendre en compte c'**
 P_{ws} : Pression hydrostatique de l'eau
 P_{wd} : Pression hydrodynamique = 0 (Comportement fermé)

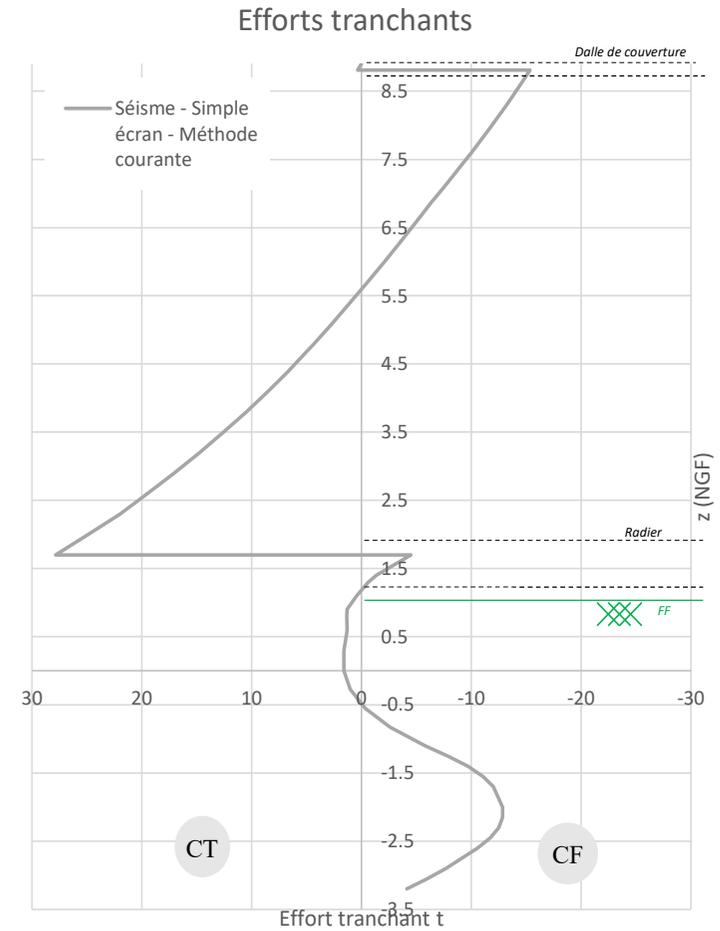
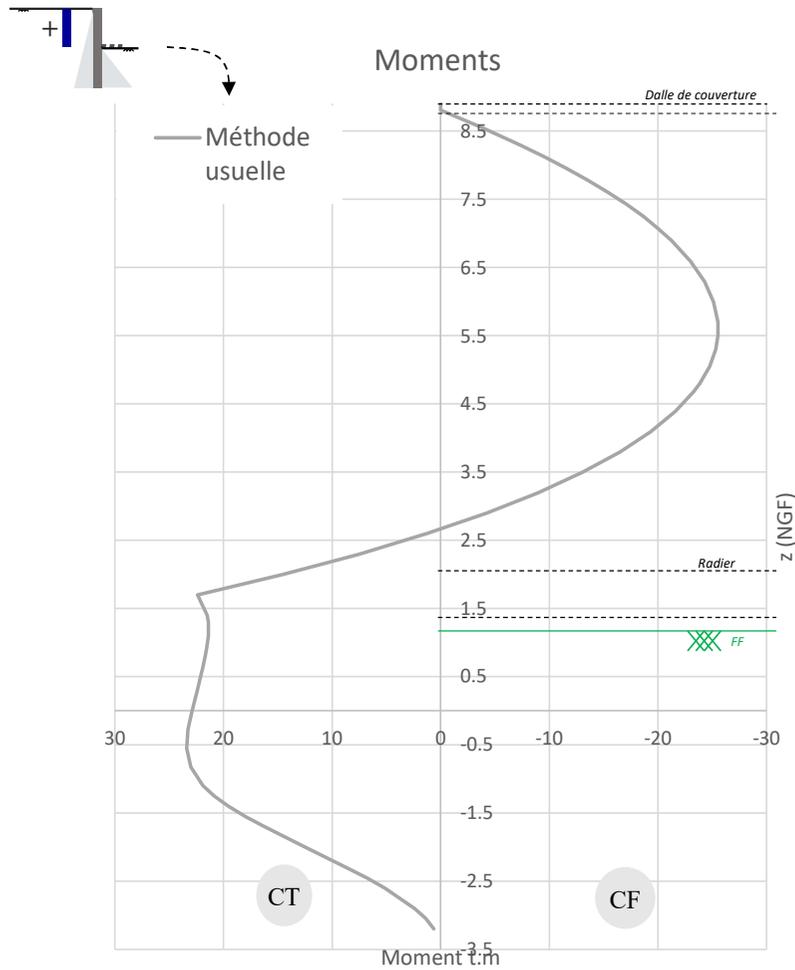
Hauteur d'application de l'incrément dynamique de poussée : **Hauteur vue**
 Point d'application de l'incrément dynamique de poussée : **H/2** (Incrément uniforme)

- Modélisation simple écran
- Incrément dynamique de poussée appliqué comme une **pression additionnelle sur l'écran**
- Raideur du sol inchangée, Module EI inchangé
- Pas de réduction de la butée
- Accélération de la paroi sous la forme d'une pression uniforme égale à $k_h \times W$

W : poids surfacique de l'écran



3. Sollicitations obtenues pour le calcul simplifié





4

Analyse comparative

4. Influence de la **méthode de calcul de la poussée dynamique**

» Méthode de Mononobe – Okabe : Influence de la prise en compte de la **cohésion**

Valeurs en prenant en compte la hauteur totale de l'écran

	Poussée dynamique P_{ad} kN/ml	Poussée statique P_{as} kN/ml	Incrément dynamique ΔP_{ad} kN/ml	Ecart %
Mononobe - Okabe - sans cohésion	1187	690	497	
Mononobe - Okabe - avec cohésion réelle	1136	661	475	-5%
Mononobe - Okabe - avec cohésion 10 kPa sur tous les sols	990	562	428	-14%
Mononobe - Okabe - avec cohésion 25 kPa sur tous les sols	743	374	369	-26%
Mononobe - Okabe - avec cohésion 50 kPa sur tous les sols	384	65	319	-36%

$$\theta = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1+k_v}\right) \text{ hors nappe} \\ \tan^{-1}\left(\frac{\gamma}{\gamma'} \times \frac{k_h}{1+k_v}\right) \text{ sous nappe} \end{cases}$$

Conclusions:

- La prise en compte de la cohésion permet de diminuer l'incrément dynamique de poussée.
- Cependant, en présence de terrains peu cohérents (cohésion inférieure à 10 kPa), la diminution de l'incrément dynamique, apportée par la prise en compte de la cohésion, est peu significative.

4. Influence de la **méthode de calcul de la poussée dynamique**

» Influence **du choix de la méthode de calcul et du choix de θ** :

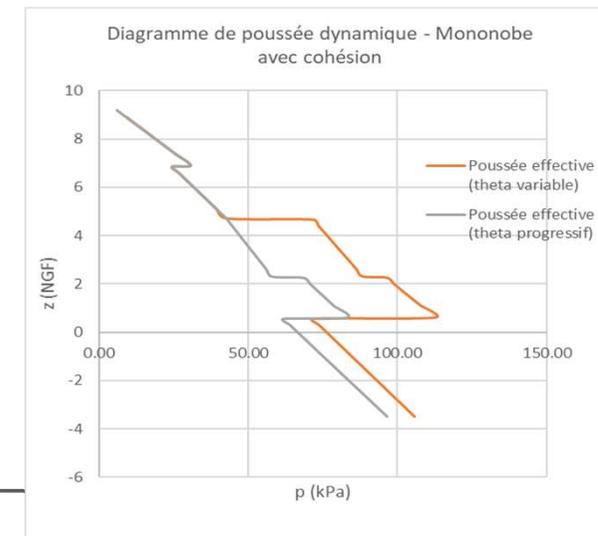
	Poussée dynamique P_{ad} kN/ml	Poussée statique P_{as} kN/ml	Incrément dynamique ΔP_{ad} kN/ml	Ecart %
Mononobe - Okabe - sans cohésion - θ variable	1187	690	497	
Mononobe - Okabe - avec cohésion - θ variable	1136	661	475	-5%
Mononobe - Okabe - avec cohésion - θ progressif	986	661	324	
Calcul à la rupture (Cinématique rotationnelle) - avec cohésion	979	651	328	
Lancelotta - avec cohésion - θ progressif	1017	665	352	

$$\theta = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1+k_v}\right) & \text{hors nappe} \\ \tan^{-1}\left(\frac{\gamma}{\gamma'} \times \frac{k_h}{1+k_v}\right) & \text{sous nappe} \end{cases}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \times \frac{k_h}{1+k_v}\right)$$

Conclusions:

- Le choix de la définition de l'angle θ a un impact significatif sur les résultats.
- L'utilisation d'un θ **progressif** semble plus cohérente

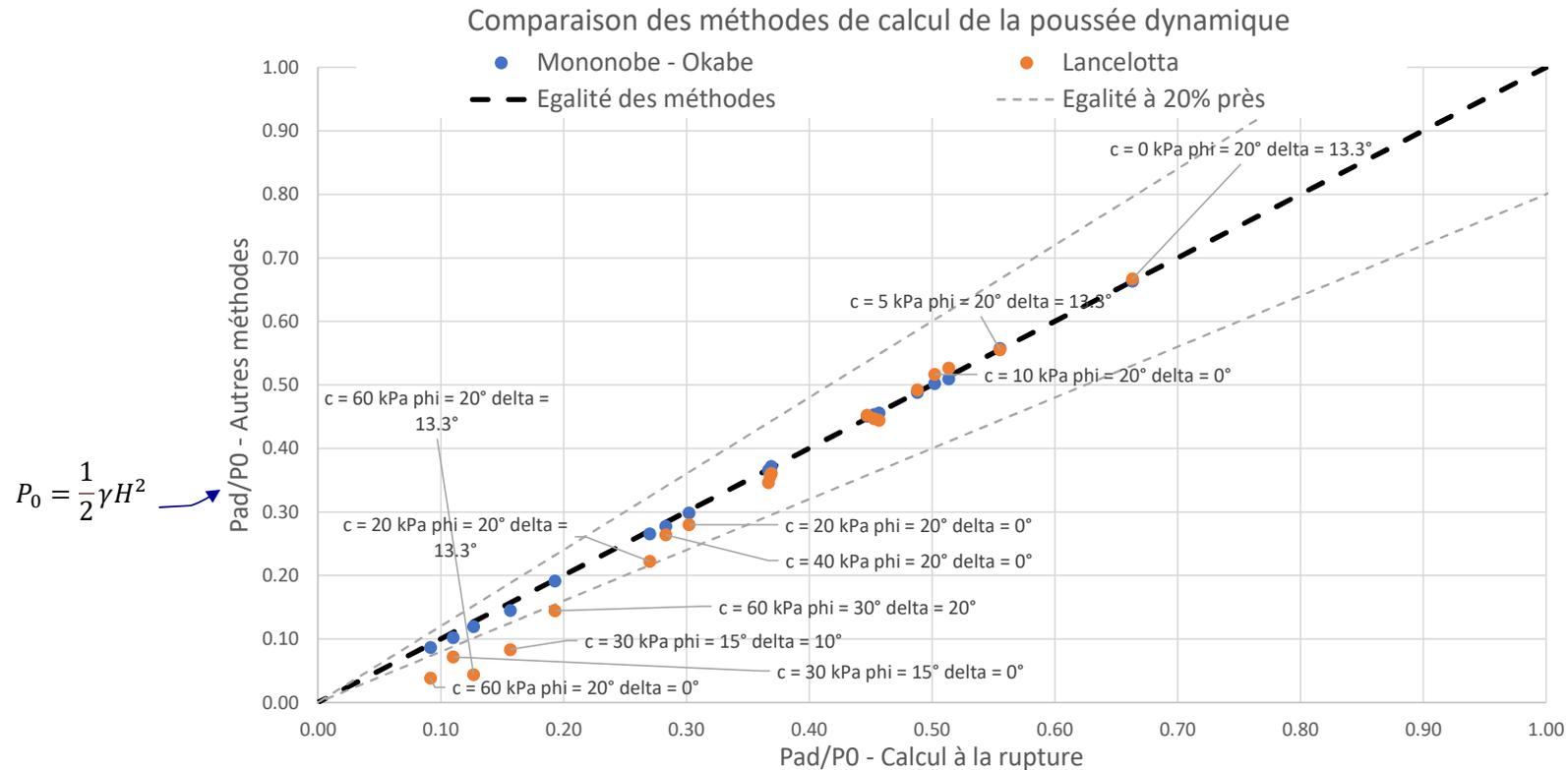


4. Influence de la méthode de calcul de la poussée dynamique



Et sur d'autres exemples...

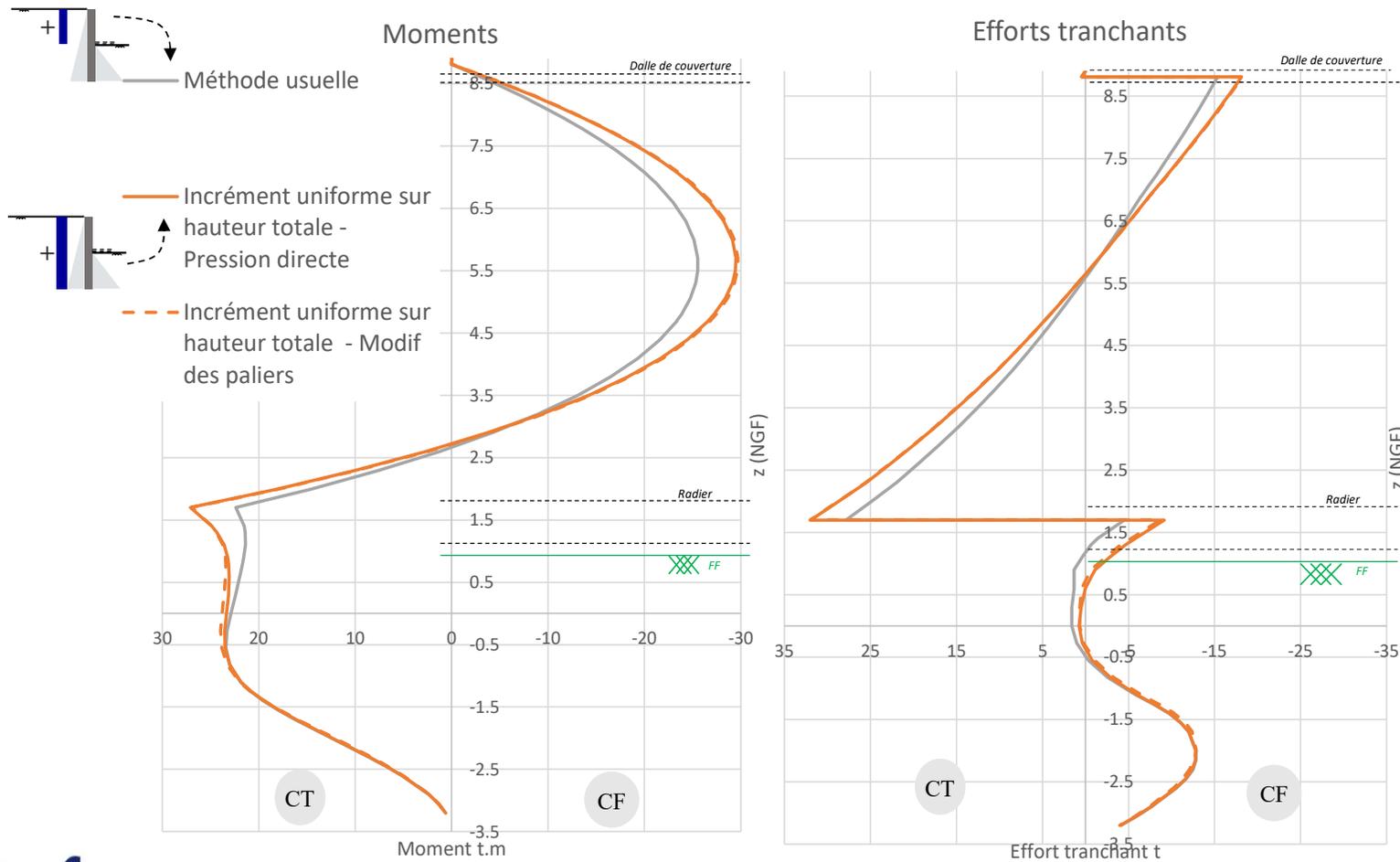
Calcul pour des sols homogènes avec cohésions et angles de frottement variables.



Conclusions:

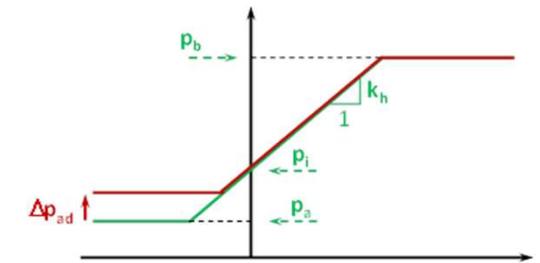
- La méthode de Lancelotta ne semble pas adaptée pour les sols avec cohésions importantes.

4. Influence de la hauteur d'application de l'incrément de poussée dynamique

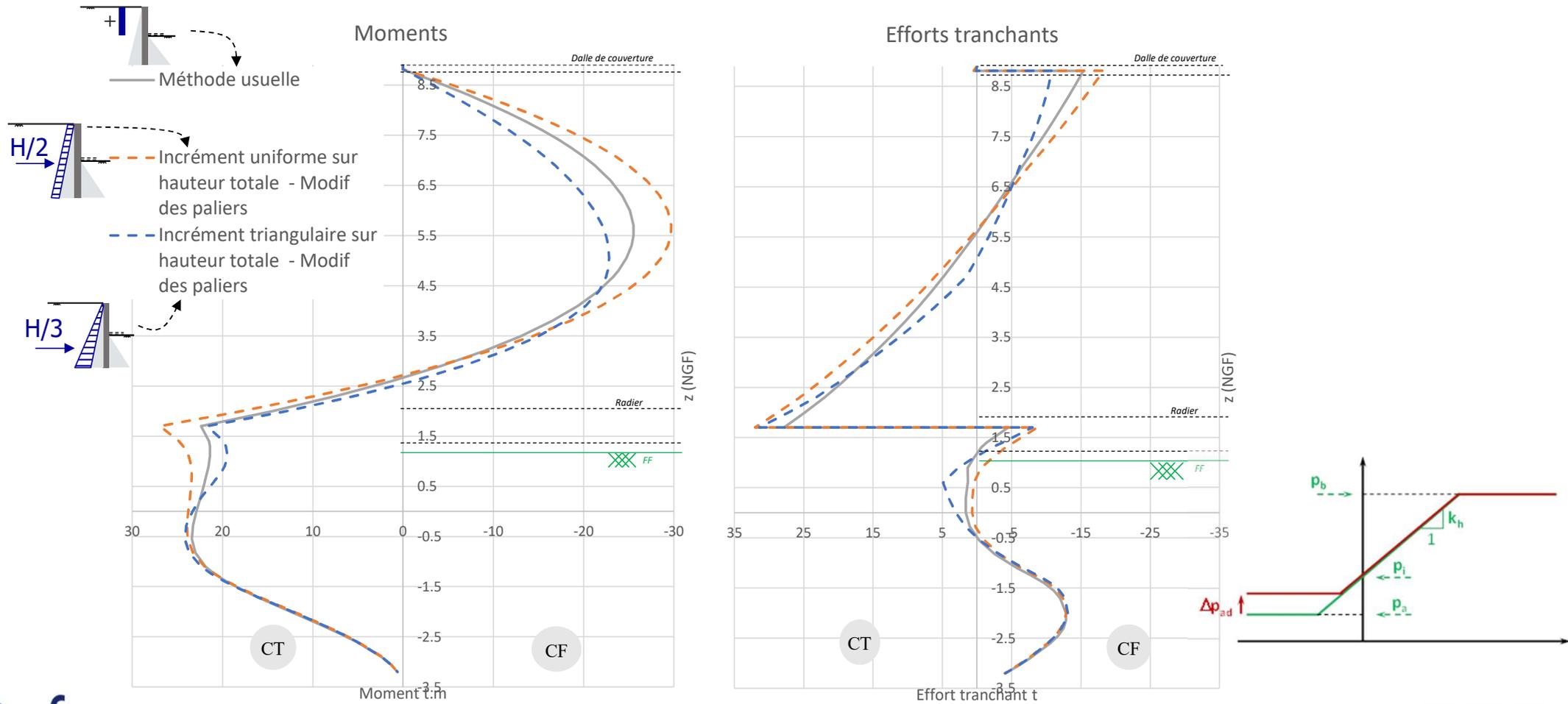


Conclusions:

- Importance d'appliquer l'incrément dynamique de poussée sur la hauteur sur laquelle le sol est en état limite de poussée
- Intérêt de la modification directe des paliers limites par rapport à l'application d'une pression directe sur l'écran

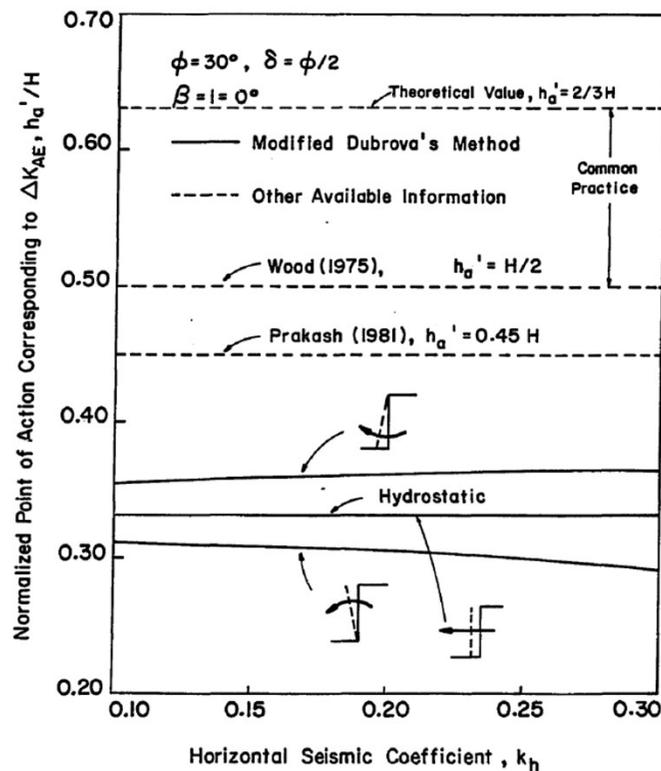


4. Influence du point d'application de l'incrément dynamique de poussée



4. Influence du **point d'application de l'incrément dynamique** de poussée

Le point d'application de l'incrément dynamique de poussée alimente les discussions scientifiques...



F. M. Chang, «Static and seismic lateral earth pressures on rigid retaining structures» 1981

Extraits de l'EC8 §7.3.2.3

(4)P En l'absence d'une étude plus détaillée prenant en compte la rigidité relative, le type de mouvement et la masse relative de l'ouvrage de soutènement, **le point d'application de la force due à la poussée dynamique des terres doit être pris à mi-hauteur du mur.**

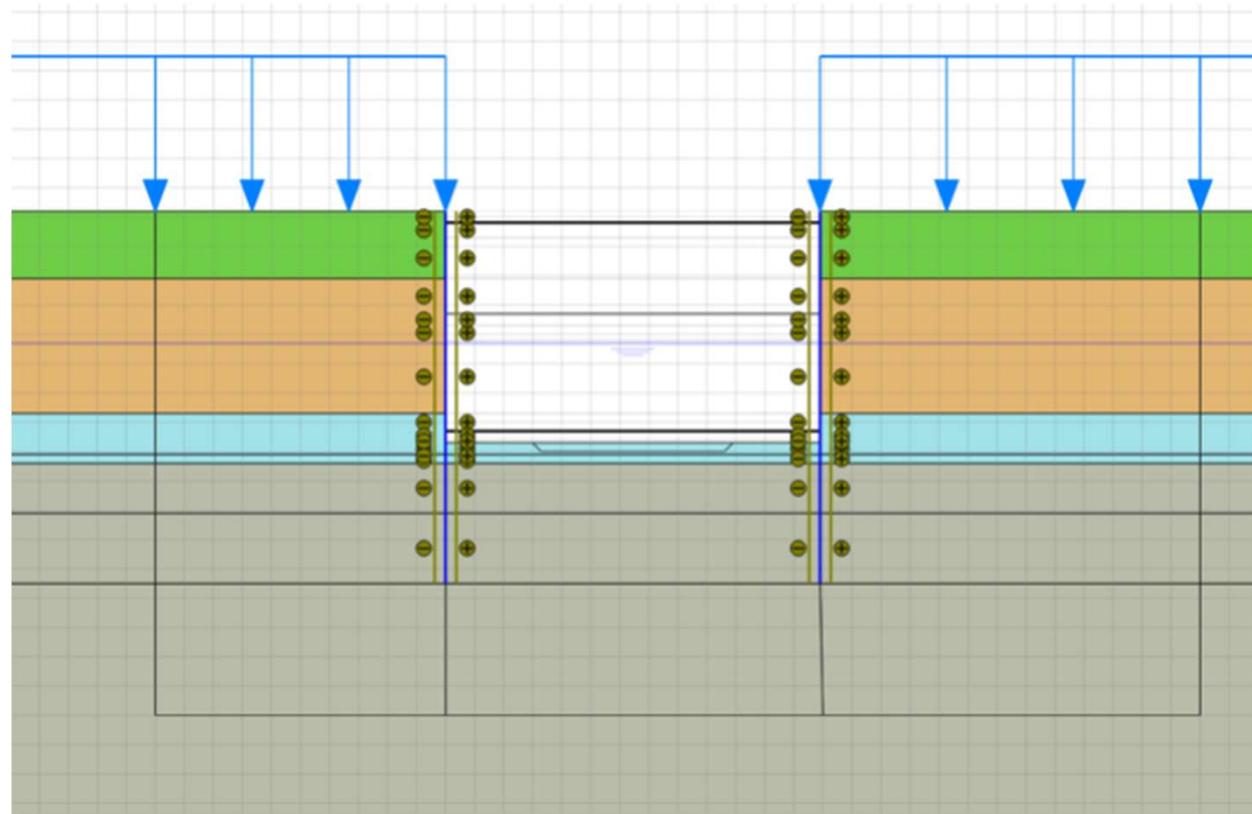
(5) Pour les murs qui peuvent tourner librement autour de leur base, **la force dynamique peut être considérée comme agissant au même point que la force statique.**

Conclusions:

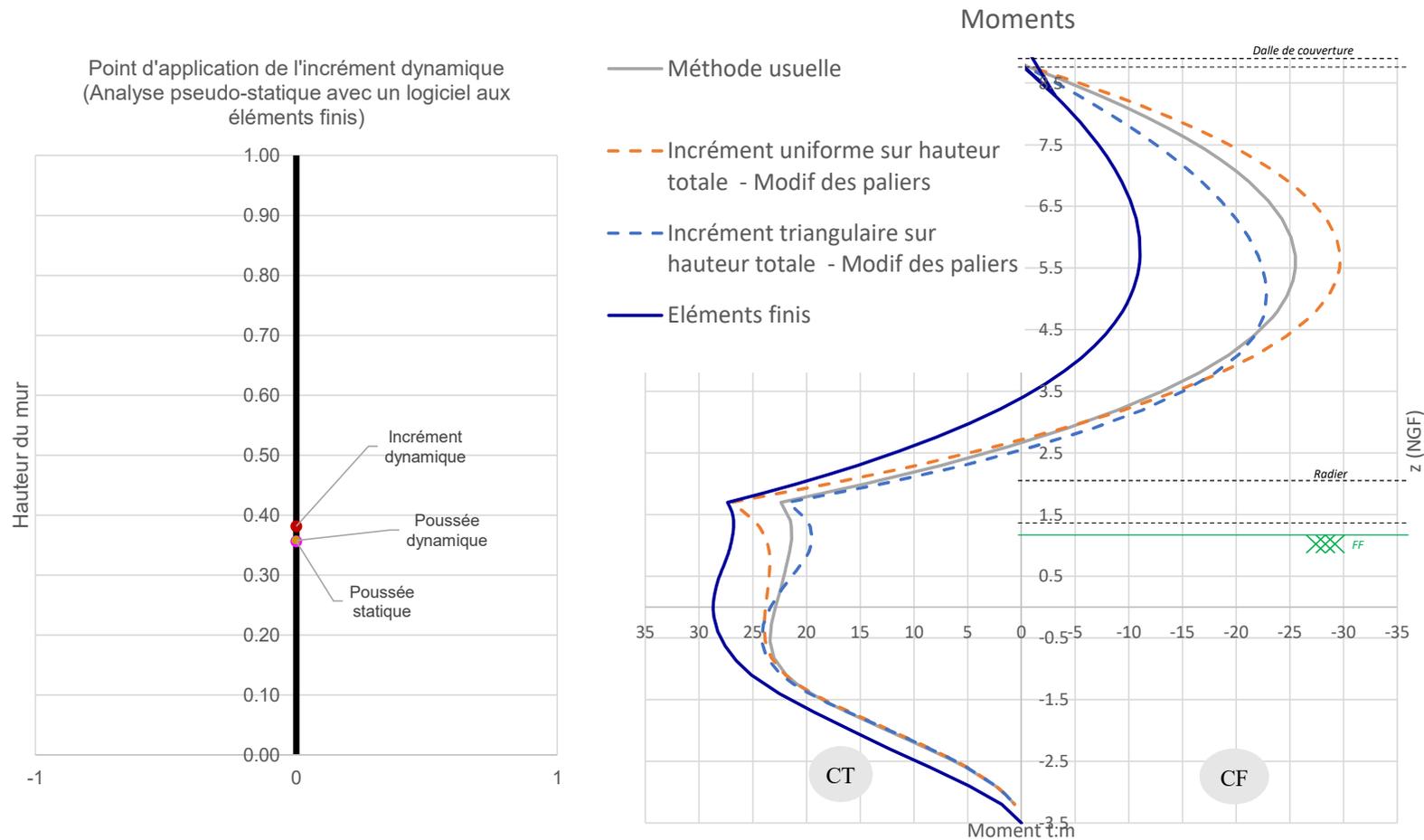
- Le point d'application de l'incrément dynamique de poussée dépend principalement:
 - Du mouvement du mur
 - De la rigidité du mur
- Il n'y a pas de consensus dans la littérature

4. Influence du point d'application de **l'incrément dynamique** de poussée

Elaboration d'un modèle aux éléments finis, pour statuer sur le sujet:



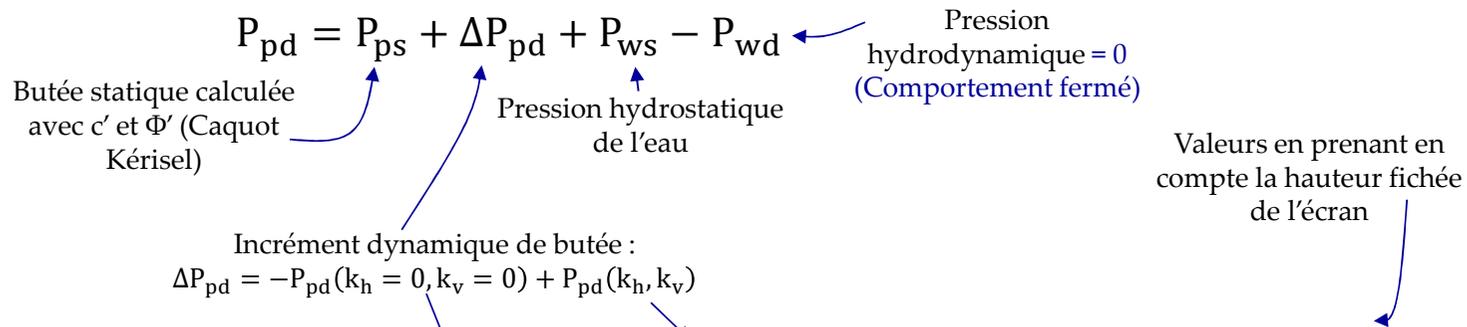
4. Influence du point d'application de l'incrément dynamique de poussée



Conclusions:

- Dans ce cas particulier, l'application d'un **incrément triangulaire** convient mieux

4. Influence de la prise en compte de la butée dynamique

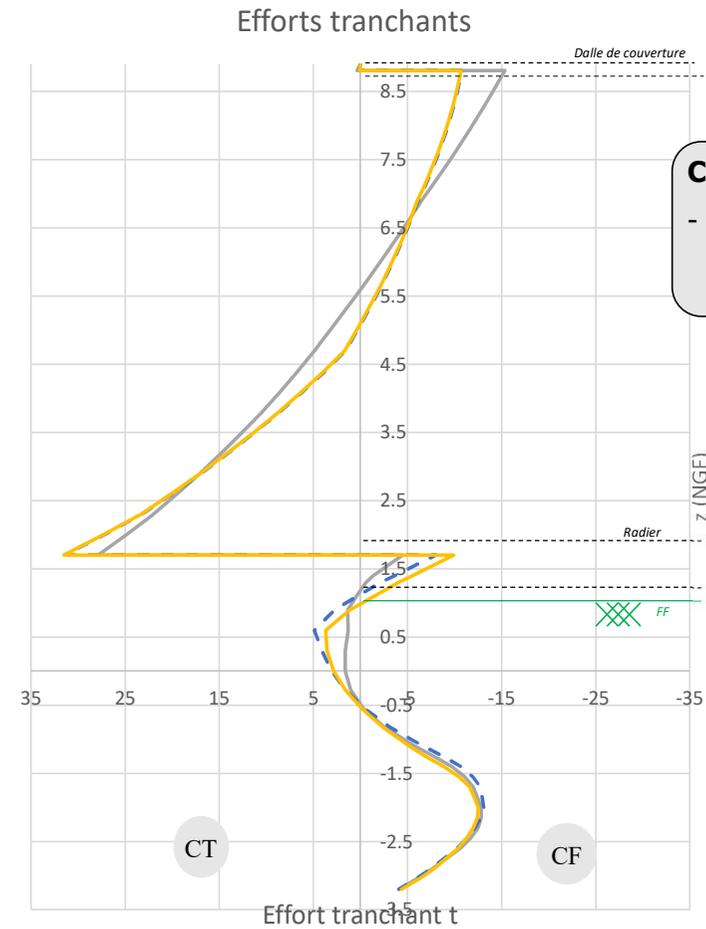
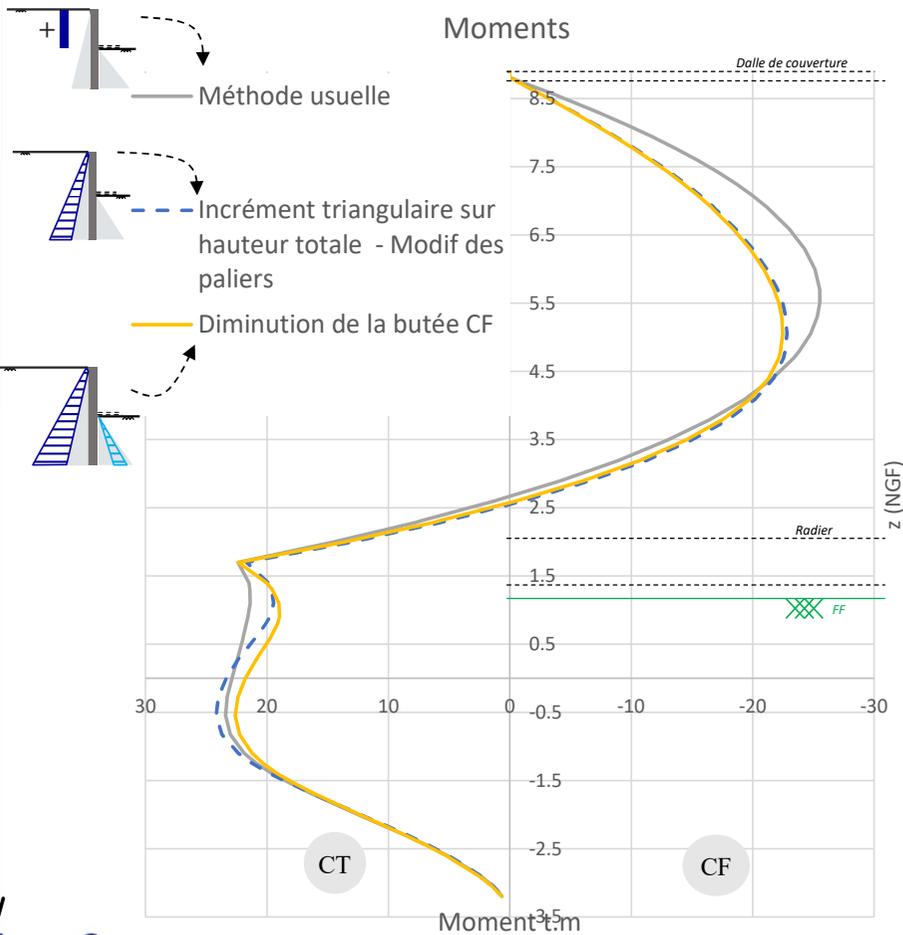


	Butée statique P_{ps} kN/ml	Butée dynamique P_{pd} kN/ml	Ecart en statique %	Ecart en dynamique %
Mononobe - Okabe - avec cohésion - avec rugosité	1482	1227		
Calcul à la rupture (Cinématique rotationnelle) - avec cohésion - avec rugosité	1232	1072	-17%	-13%
Lancelotta - avec cohésion - avec rugosité	1070	911	-28%	-26%
Mononobe - Okabe - sans cohésion - sans rugosité	577	486		

Conclusions:

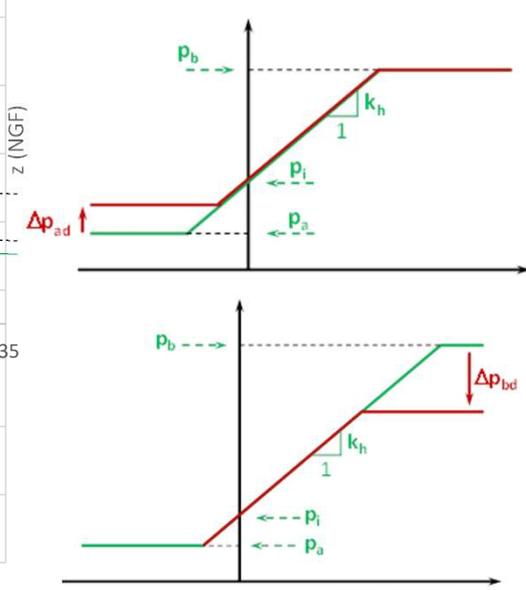
- La méthode de Mononobe-Okabe (adaptation de la théorie du coin de Coulomb) ne permet pas de prendre en compte correctement la rugosité de la paroi.
- Les méthodes du calcul à la rupture et de Lancelotta sont donc plus adaptées.

4. Influence de la diminution de la butée

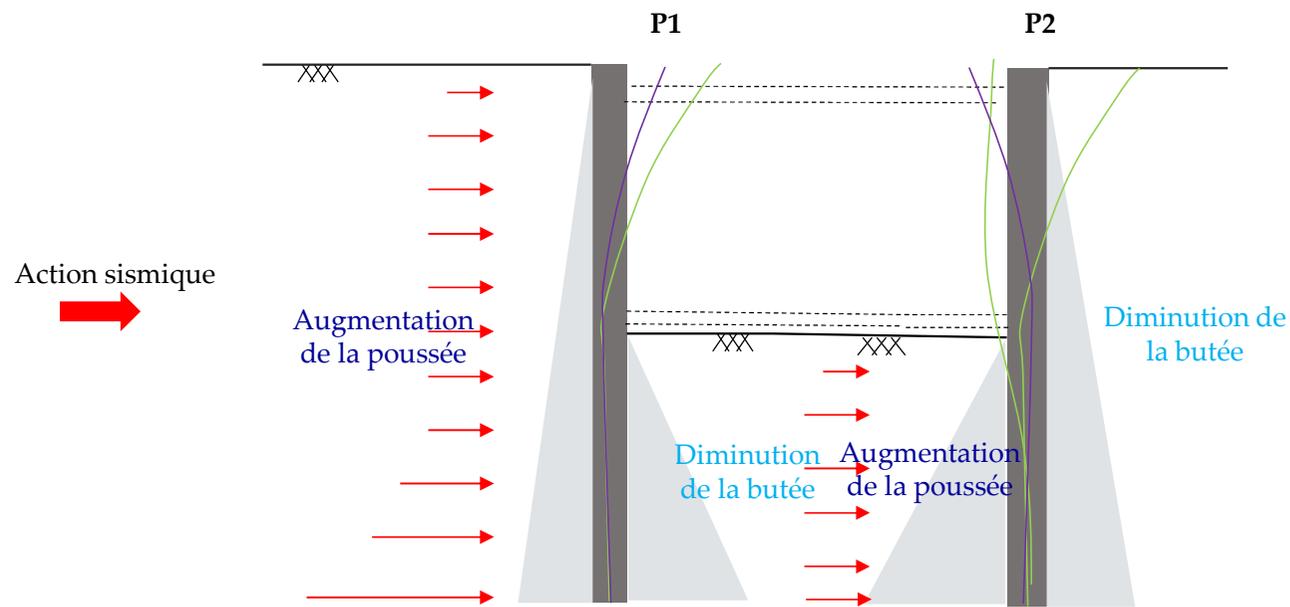


Conclusions:

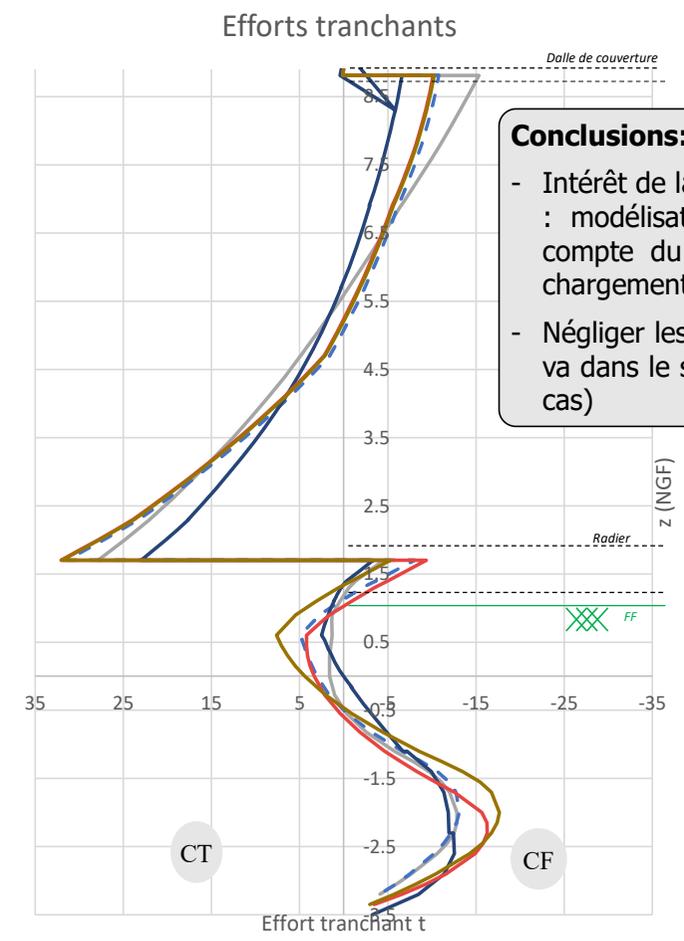
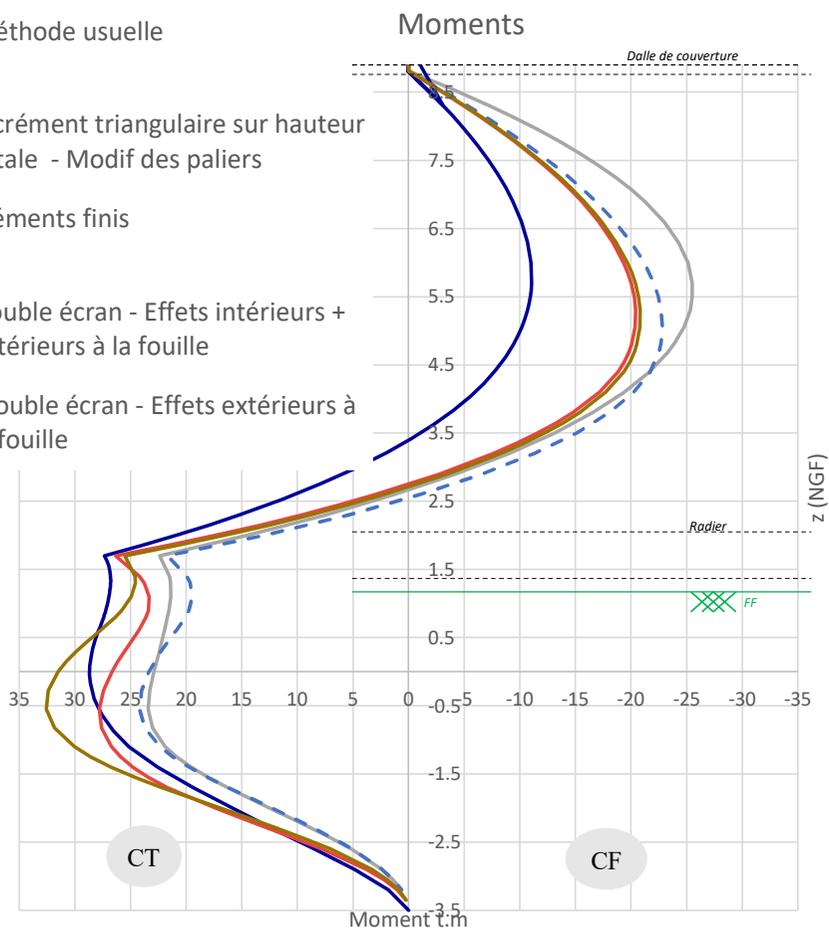
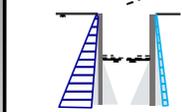
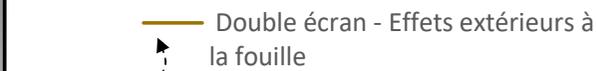
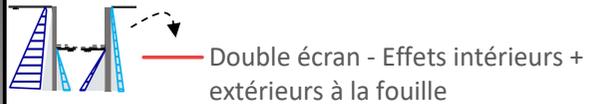
- La prise en compte de la diminution de la butée a, dans ce cas, peu d'impact sur les sollicitations.



4. Influence de la **modélisation double écran**



4. Influence de la **modélisation double écran**



Conclusions:

- Intérêt de la **modélisation double écran** : modélisation permettant de rendre compte du caractère asymétrique du chargement sismique
- Négliger les effets intérieurs à la fouille va dans le sens de la sécurité (dans ce cas)

5

Synthèse et perspectives

Synthèse

Éléments à retenir:

» Calcul de l'incrément dynamique de poussée des terres

- Il peut être réalisé avec l'une ou l'autre des méthodes présentées. Privilégier la méthode cinématique du calcul à la rupture pour des sols avec cohésions importantes.
- La prise en compte de la cohésion permet de diminuer l'incrément dynamique de poussée (de manière significative, pour des sols avec cohésions importantes)
- Le choix d'un angle θ progressif semble plus adapté pour une nappe non affleurante

» Application de l'incrément dynamique de poussée

- Doit se faire **sur toute la hauteur de l'écran où le sol est en état limite de poussée.**
- Deux procédures possibles:
 - Itérative: Par exemple, application d'une pression directe sur l'écran sur la hauteur totale puis analyse des états du sol puis réitération avec application uniquement sur hauteur en poussée
 - Directe: modification directe des paliers limites de poussée

» Point d'application de l'incrément dynamique de poussée

- Dans le cas étudié, la modélisation aux éléments finis a montré que le point d'application de la poussée dynamique était quasiment superposé au point d'application de la poussée statique

Synthèse

» Butée dynamique des terres

- La méthode de Mononobe - Okabe n'est pas adaptée pour prendre en compte la rugosité de la paroi.
- Les autres méthodes présentées (Calcul à la rupture, Lancelotta) permettent de prendre en compte cette rugosité

» Modélisation double écran

- **Nécessaire pour rendre compte du chargement sismique (par nature asymétrique)**
- Dans le cas d'un séisme se propageant d'une paroi P1 vers la paroi P2, il y aurait alors lieu de prendre en compte les effets suivants:
 - Sur la paroi P1:
 - Augmentation de la poussée (Côté Terre)
 - Diminution de la butée (Côté Fouille)
 - Sur la paroi P2:
 - Augmentation de la poussée (Côté Fouille)
 - Diminution de la butée (Côté Terre)
- Négliger les **effets intérieurs à la fouille** va dans le sens de la sécurité (dans le cas étudié)

5. Perspectives – Choix du r

» Signification du coefficient r

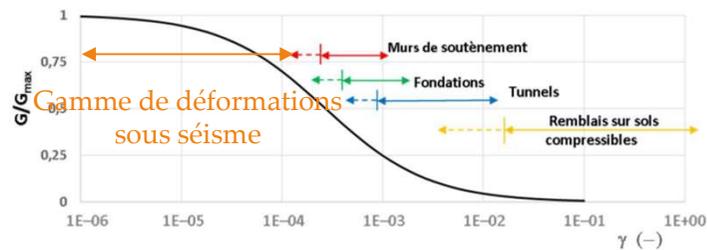
$$k_h = \frac{a_g}{g} \times \frac{S}{r}$$

Le coefficient r **permet implicitement de se ramener à l'accélération critique**, accélération pour laquelle le système plastifie entièrement. En effet, il est inutile de dimensionner l'ouvrage avec une accélération supérieure à l'accélération critique car, au-delà de l'accélération critique, les forces internes de la structure n'évoluent plus. Le sol agit comme élément dissipateur de l'énergie. (voir L. Callisto, «On the seismic design of displacing earth retaining structures,» chez Earthquake Geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions, Rome (Italie), 2019.)

Ainsi, pour orienter le choix du r, **il serait bien d'estimer l'accélération déstabilisante.**

5. Perspectives – Faut-il modifier la raideur du sol ?

» Déformabilité des sols sous séisme

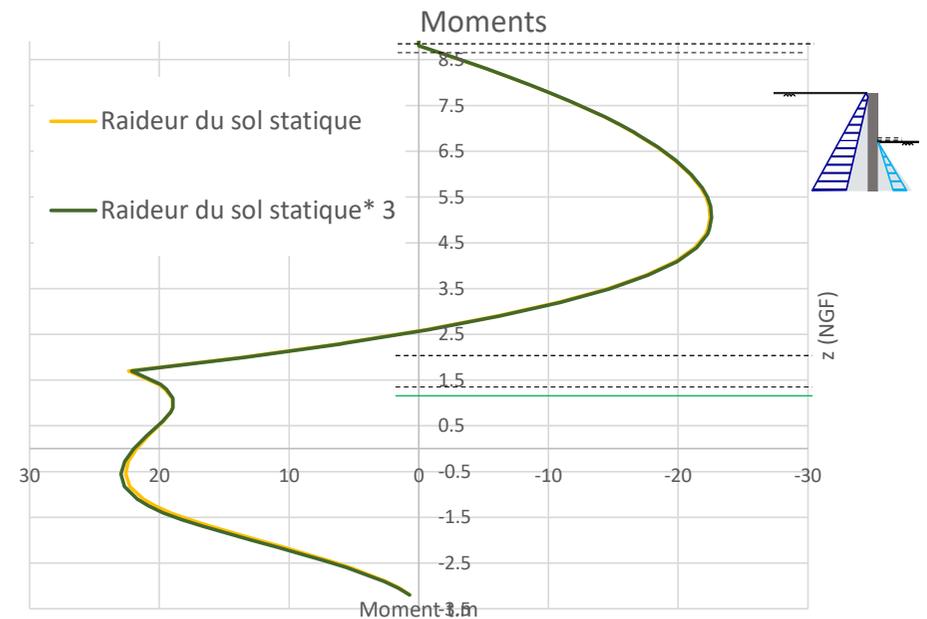


Pour des séismes modérés à importants, les gammes de distorsion des écrans de soutènement, en conditions sismiques, sont quasiment les mêmes qu'en conditions statiques.

⇒ Il est possible **de garder la même raideur du sol en statique et en sismique**

» Effet de la multiplication de la raideur du sol par 3

Pas d'impact significatif



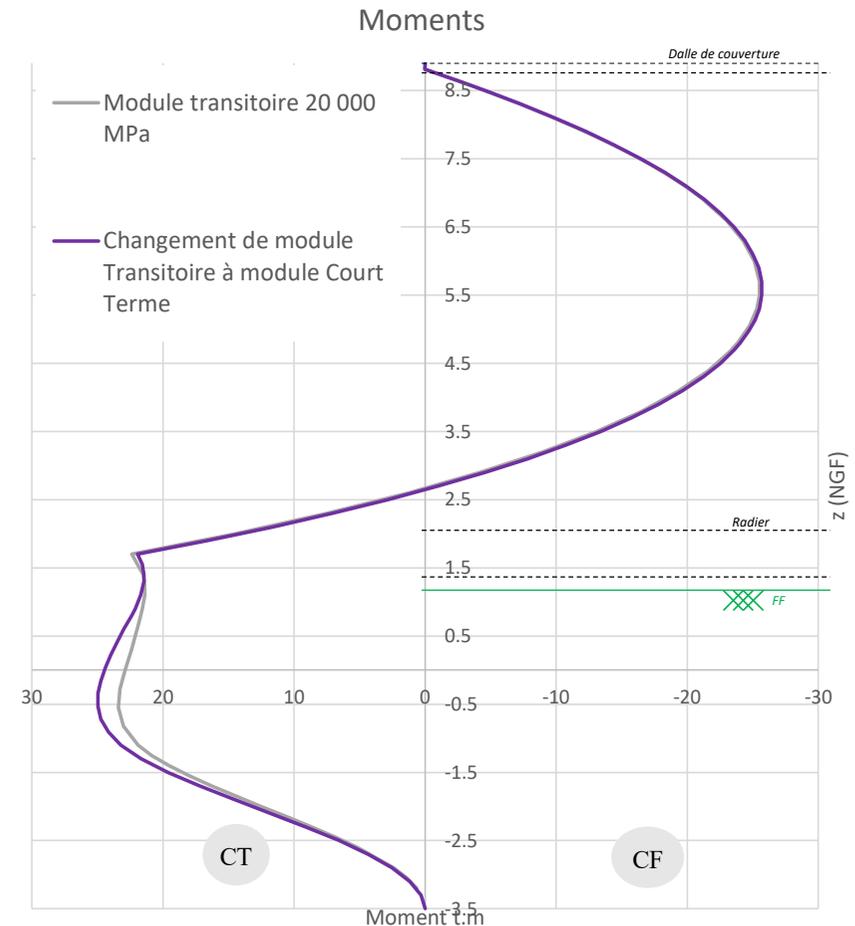
5. Perspectives – Influence du module de la paroi

» Effet de la variation du produit d'inertie EI

	Court Terme	Transitoire	Long Terme
Module approximatif du béton E (MPa)	30 000	20 000	10 000

Module sous séisme

La modification du module ne provoque pas d'augmentation significative des moments.



5. Perspectives – Gestion de la sécurité et prise en compte des efforts inertiels de la superstructure

» Gestion de la sécurité

Conformément à l'Eurocode 8, **l'approche 3 doit être adoptée pour le calcul sismique.**

Ainsi, pour les calculs des incréments dynamiques de poussée et de butée, il est nécessaire de prendre en compte un coefficient de 1.25 sur $\tan(\phi)$ et 1.4 sur c_u .

» Efforts inertiels de la superstructure

Les efforts inertiels, issus du modèle de la superstructure (ISS), doivent être pris en compte dans le calcul de l'écran butonné.

Etude parasismique d'un écran de soutènement butonné en milieu urbain

Merci pour votre attention