



Webinaires des 12 Avril et 10 Mai 2022

Soutènements en zone sismique – Partie I

Séance du 12 Avril 2022 animée par :

- Fahd CUIRA
- Delphine BOUTHEON
- Gilles VALDEYRON
- Stéphane BRULE
- Dominique BATISTA
- TERRASOL – CFMS
- ERG – CFMS
- CEREMA – CNJOG
- MENARD – AFPS/CFMS
- CEREMA

Sommaire

Partie I – 12 Avril 2022 de 10h30 à 12h30

- Stratégie de dimensionnement sous séisme (25 min)
- Evaluation des poussées et butées dynamiques (35 min)
- REX post-séisme en milieux urbain et maritime (35 min)
- Questions réponses (25 min)

Sommaire

Partie II – 10 Mai 2022 de 10h30 à 12h30

- Soutènements gravitaires
- Soutènement définitif d'une fouille urbaine
- Soutènements en milieu maritime
- Perspectives normatives (nouvel EC8, ouvrages portuaires)

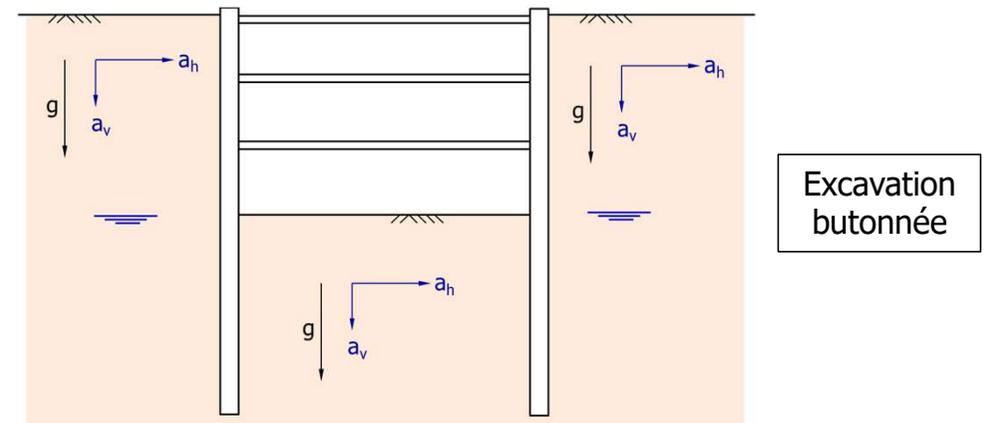
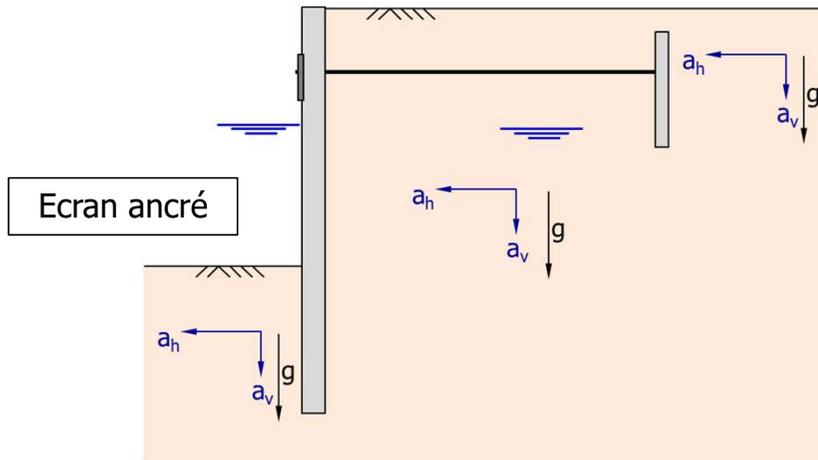
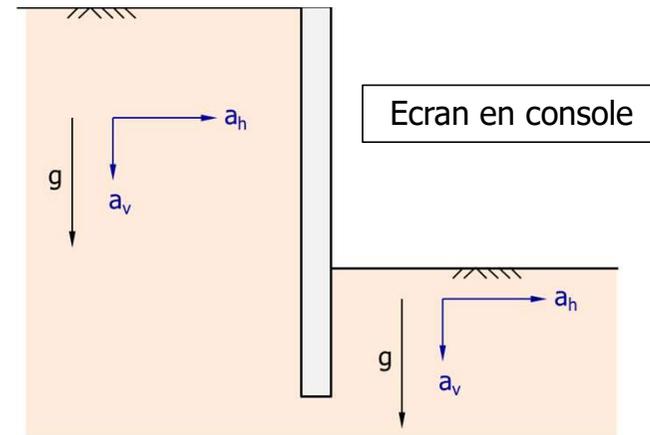
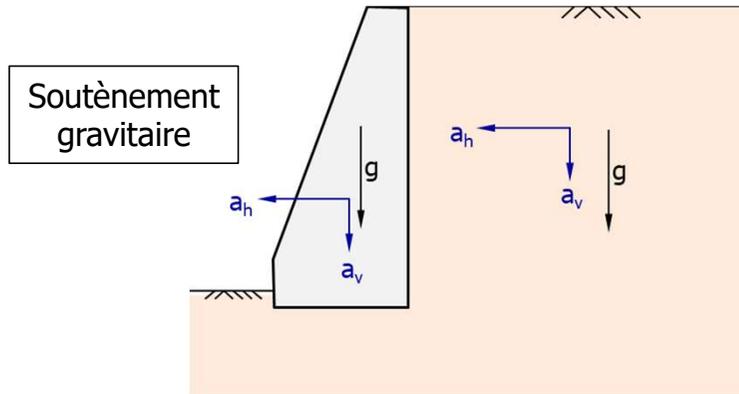
Sommaire

Partie I – 12 Avril 2022 de 10h30 à 12h30

- Stratégie de dimensionnement sous séisme
- Evaluation des poussées et butées dynamiques
- REX post-séisme en milieux urbain et maritime

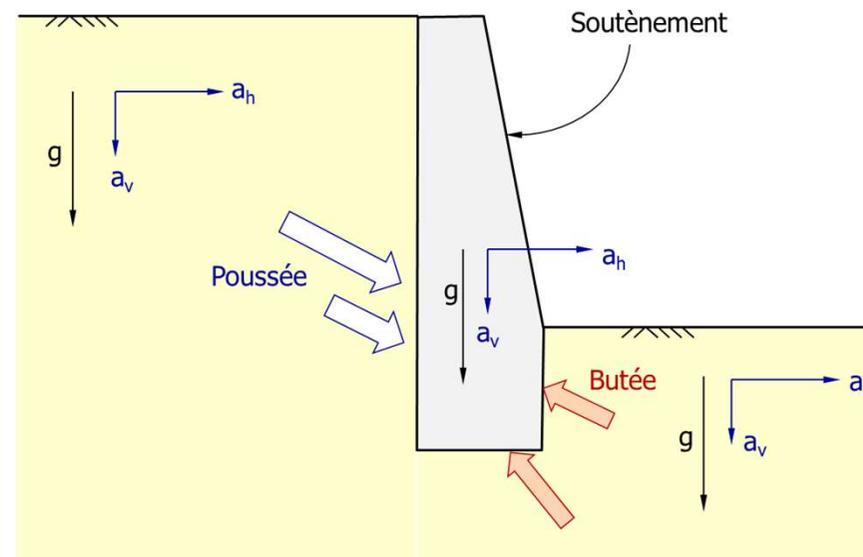
Objet du webinaire

- Ouvrages de soutènement soumis à action sismique



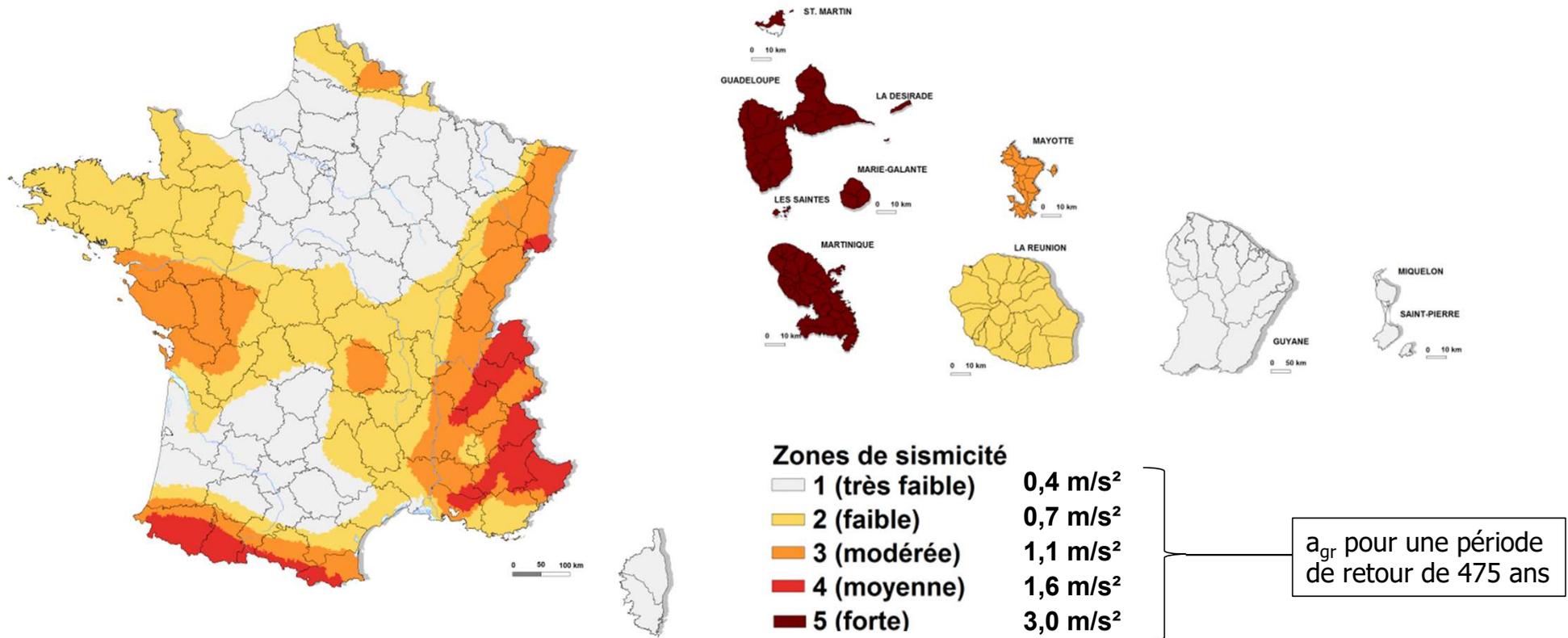
Stratégie de dimensionnement sous séisme

- Les points clés à gérer pour un ouvrage de soutènement
 - ⇒ Action sismique (et forces d'inertie qui en résultent dans le terrain et l'ouvrage de soutènement)
 - ⇒ Comportement des terrains sous séisme (tenant compte des effets de couplage hydromécanique)
 - ⇒ Poussée et butée dynamiques des terres (tenant compte des forces d'inertie sismiques)
 - ⇒ Comportement des ancrages sous séisme (mouvements différentiels)
 - ⇒ Identification des modes de ruine potentiels (et formalismes de justification associés)



Choix de l'action sismique

- Accélération sismique de référence a_{gr} – zonage sismique administratif



Choix de l'action sismique

- Accélération sismique maximale (PGA) selon le formalisme de l'Eurocode 8

$$a_N = \underbrace{\gamma_I}_{\text{classe ouvrage}} \times \underbrace{a_{gr}}_{\text{Zone sismique}} \times \underbrace{S}_{\text{classe sol}} \times \underbrace{S_T}_{\text{Topographie}}$$

γ_I	Catégorie d'importance de l'ouvrage	I	II	III	IV	
	Valeurs du coefficient d'importance γ_I	0,80	1,00	1,20	1,40	
a_{gr}	Zone de sismicité	1	2	3	4	5
	Accélération max de référence (m/s ²)	0,40	0,70	1,10	1,60	3,00
S	Classe du sol sous l'ouvrage	A	B	C	D	E
	Valeur de S pour les zones sismiques 1 à 4	1,00	1,35	1,50	1,60	1,80
	Valeur de S pour la zone sismique 5	1,00	1,20	1,15	1,35	1,40

Choix de l'action sismique

- Le rôle du coefficient d'importance γ_I – lien avec la période de retour

	Catégorie Importance	Coefficient Importance	Période de retour	Probabilité de dépassement
I	Structures secondaires	0,80	250 ans	18%
II	Structures courantes	1,00	475 ans	10%
III	Structures essentielles	1,20	800 ans	6%
IV	Structures primordiales	1,40	1 300 ans	4%
	ICPE (existantes)	1,85	3 000 ans	2%
	ICPE (nouves)	2,20	5 000 ans	1%

$$\gamma_I = \sqrt[3]{\frac{T_{\text{retour}}}{T_{475}}}$$

$$P(a \geq a_g) = 1 - \exp\left(-\frac{D_{\text{vie}}}{T_{\text{retour}}}\right)$$

Choix de l'action sismique

- Le rôle du facteur S – Classification du terrain

Classe	Description	Paramètres		
		$V_{S,30}$ (m/s)	N (SPT)	C_u (kPa)
A	Rocher – Au plus 5m d'alluvions	> 800	-	-
B	Sable très dense, gravier, argile raide; $h > 10m$	360 - 800	> 50	> 250
C	Sable dense, moyennement dense; argile raide; $h = 10 - 100 m$	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Sable lâche, moyennement dense; argile ferme à molle	< 180	< 15	< 70
E	Alluvions C ou D, $h = 5 - 20m$ Surmontant rocher (A)			
S_1	Couches contenant strates $h > 10m$ Argile molle ($IP > 40$), w élevée	< 100 (indicatif)	-	10 - 20
S_2	Sites liquéfiables; tout autre type de site non référencé ci dessus			

S = 1,00

S = 1,35

S = 1,50

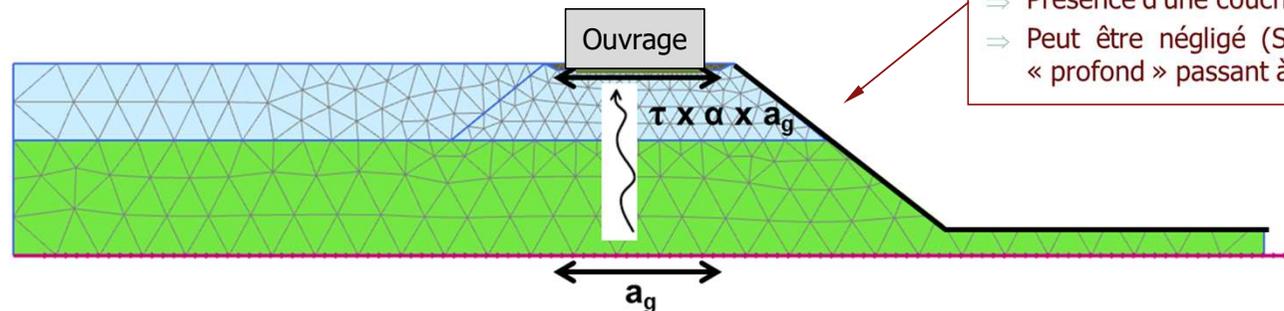
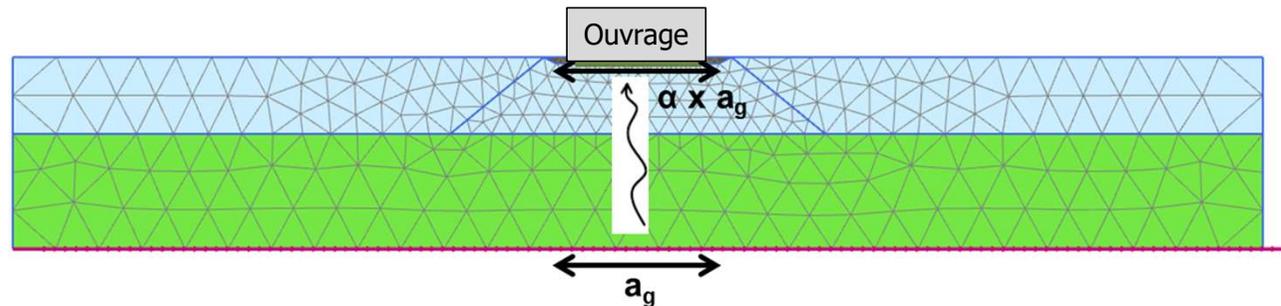
S = 1,60

S = 1,80

pour zones
1 à 4

Choix de l'action sismique

- Effet d'amplification topographique (facteur S_T)



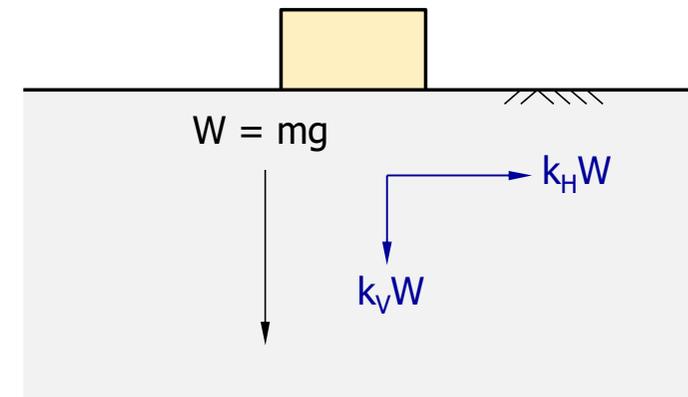
- ⇒ Majoration de l'action sismique pour le cas des structures importantes (catégories 3 et 4) situées sur ou à proximité des pentes ($> 15^\circ$)
- ⇒ Versants et pentes isolées $\Rightarrow S_T \geq 1,2$
- ⇒ Buttes $\Rightarrow S_T \geq 1,4$ à proximité de la crête des pentes $> 30^\circ$ (1,2 sinon)
- ⇒ Présence d'une couche lâche en surface $\Rightarrow S_T$ majoré de 20%.
- ⇒ Peut être négligé ($S_T = 1,0$) dans le cas d'un mécanisme de rupture « profond » passant à proximité de la base

Choix de l'action sismique

- Principe de l'approche pseudo-statique

- ⇒ Simulation de l'action sismique par deux forces d'inertie équivalentes F_H et F_V proportionnelles au poids W : $F_H = k_H \cdot W$ et $F_V = k_V \cdot W$
- ⇒ Les coefficients sismiques k_H et k_V correspondent respectivement aux composantes horizontale et verticale a_H et a_V de l'action sismique du calcul. On a par définition : $a_H = k_H g$ et $a_V = k_V g$
- ⇒ Les valeurs de k_H et k_V sont calées sur une fraction du rapport a_N/g :

$$k_H = \frac{1}{r} \frac{a_N}{g} \quad k_V = \pm 0,3 \text{ à } 0,5 k_H$$



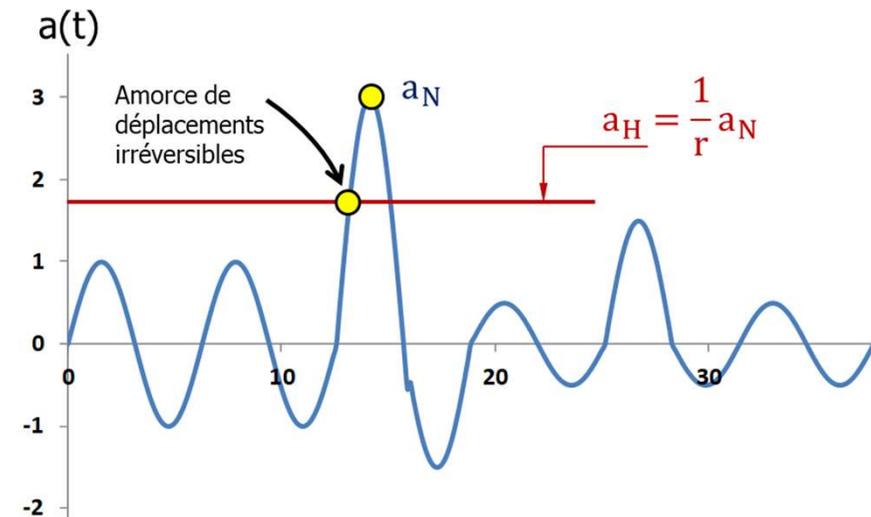
Choix de l'action sismique

- Principe de l'approche pseudo-statique

- ⇒ Simulation de l'action sismique par deux forces d'inertie équivalentes F_H et F_V proportionnelles au poids W : $F_H = k_H \cdot W$ et $F_V = k_V \cdot W$
- ⇒ Les coefficients sismiques k_H et k_V correspondent respectivement aux composantes horizontale et verticale a_H et a_V de l'action sismique du calcul. On a par définition : $a_H = k_H g$ et $a_V = k_V g$
- ⇒ Les valeurs de k_H et k_V sont calées sur une fraction du rapport a_N/g :

$$k_H = \frac{1}{r} \frac{a_N}{g} \quad k_V = \pm 0,3 \text{ à } 0,5 k_H$$

- ⇒ Valeur du coefficient « r » fonction de la capacité de l'ouvrage à accepter des déplacements irréversibles post-séisme (selon conditions exploitation et de liaison ext.)
- ⇒ Pas de déplacements irréversibles si $r = 1$
- ⇒ Déplacements irréversibles non nuls si $r > 1$



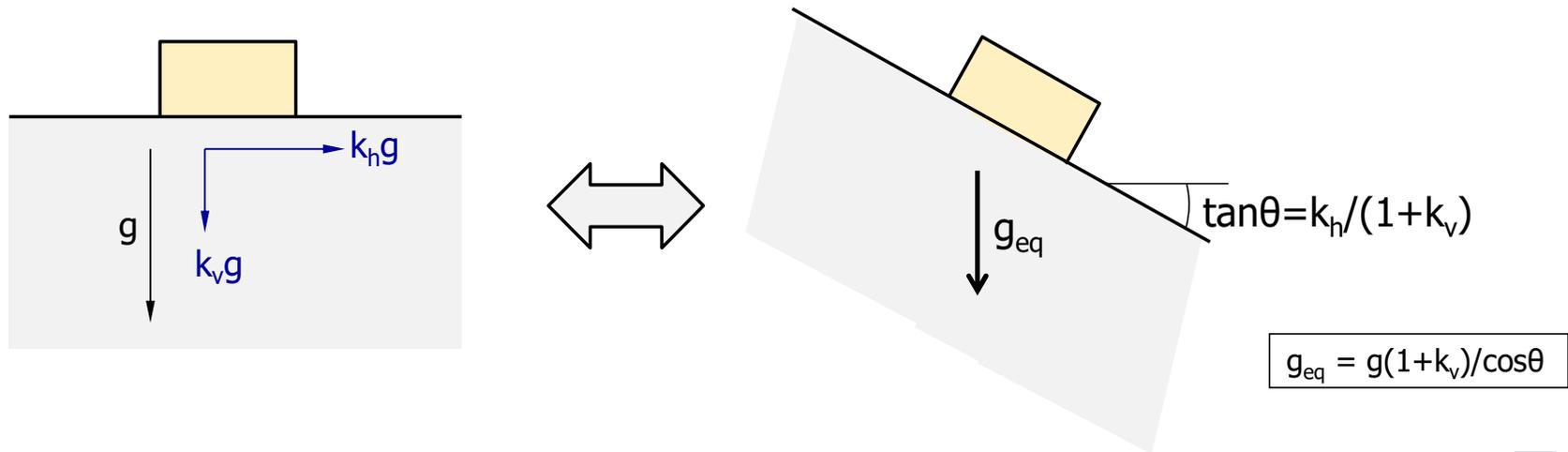
Comportement des terrains sous séisme

- Propriétés de résistance au cisaillement sous séisme
 - ⇒ Terrains hors nappe = mêmes propriétés de résistance que sous action statique
 - ⇒ Terrains « Ouverts » sous nappe (perméabilité $> 5 \times 10^{-3}$ m/s) = comportement drainé
 - ⇒ Terrains « Fermés » sous nappe (perméabilité $< 5 \times 10^{-4}$ m/s) = comportement non drainé
 - ⇒ Choix des propriétés au cisaillement pour certains terrains types

	Comportement	Paramètres
Graves	Frottant	ϕ'
Sables hors nappe	Frottant	ϕ'
Sables sous nappe	Frottant Cohérent	$\phi' + \Delta u$ $\tau_{cy,u}$
Sols fins	Cohérent	c_u

Comportement des terrains sous séisme

- Vérification de la stabilité sismique du site (en l'absence de l'ouvrage)
 - ⇒ Toujours commencer par examiner les conditions de stabilité « initiale » du site sous séisme (même quand celui-ci est initialement horizontal) : cela permet de juger de la pertinence des hypothèses du projet (action sismique vs résistance mécanique)
 - ⇒ Par défaut, un soutènement n'est pas forcément un élément de renforcement et n'a donc pas nécessairement vocation à améliorer les conditions de stabilité initiale du site => inutile de chercher à justifier la tenue au séisme d'un ouvrage soutenant un site instable sous séisme !



Comportement des terrains sous séisme

- Vérification de la stabilité sismique du site (en l'absence de l'ouvrage)
 - ⇒ Toujours commencer par examiner les conditions de stabilité « initiale » du site sous séisme (même quand celui-ci est initialement horizontal) : cela permet de juger de la pertinence des hypothèses du projet (action sismique vs résistance mécanique)
 - ⇒ Par défaut, un soutènement n'est pas forcément un élément de renforcement et n'a donc pas nécessairement vocation à améliorer les conditions de stabilité initiale du site => inutile de chercher à justifier la tenue au séisme d'un ouvrage soutenant un site instable sous séisme !
 - ⇒ En présence d'un terrain potentiellement liquéfiable => traitement préalable du problème de liquéfaction. Il convient dans tous les cas de rappeler que l'obtention d'une sécurité $F_{\text{liquéfaction}} = 1,25$ vis-à-vis du risque de liquéfaction ne signifie pas absence de surpressions interstitielles. Celles-ci ne peuvent être négligées dans le calcul de soutènement que pour $F_{\text{liquéfaction}} \geq 2,00$ (EC8-5 - §7.3.2.2(5)).

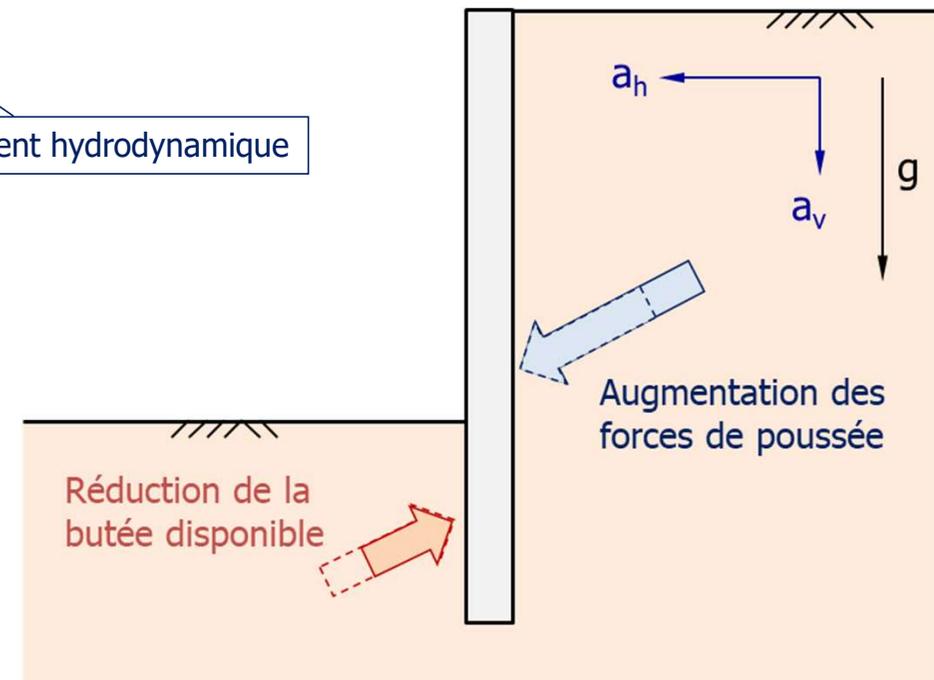
Poussée et butée dynamiques des terres

- Formalisme général – Poussée

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

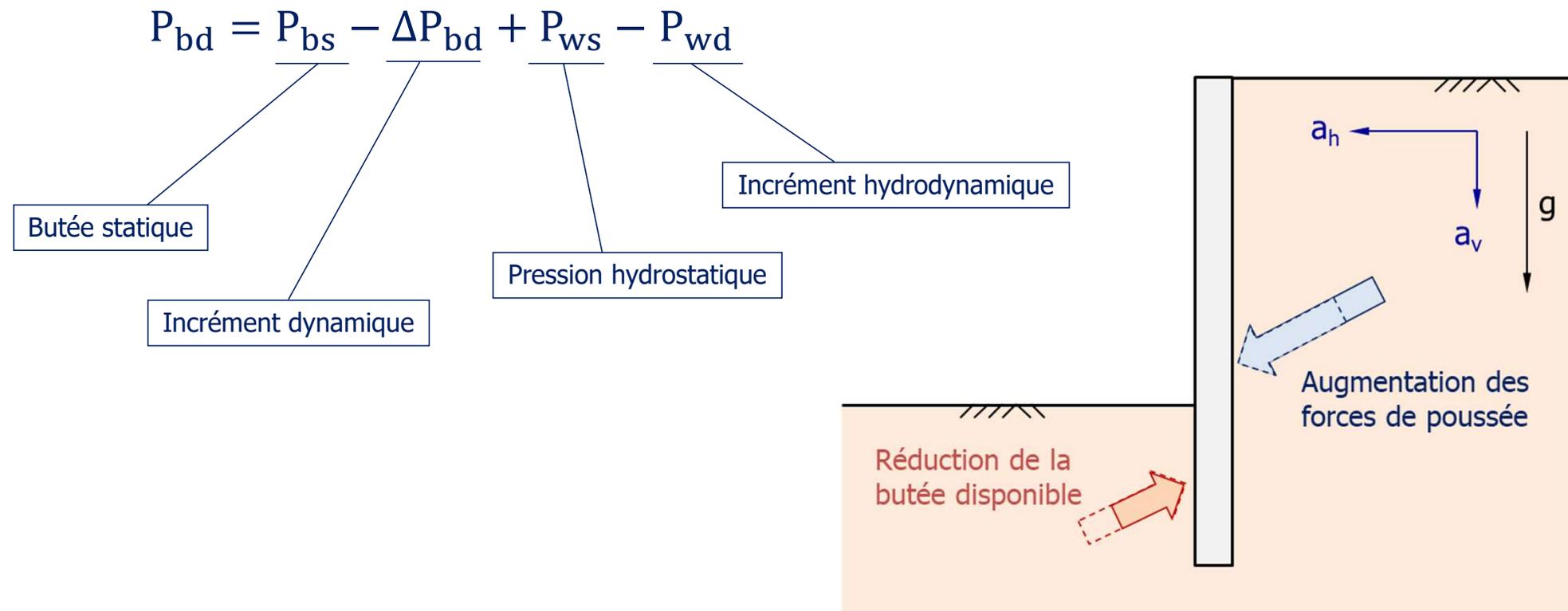
Diagram illustrating the components of the dynamic earth pressure formula:

- P_{as} : Poussée statique (Static earth pressure)
- ΔP_{ad} : Incrément dynamique (Dynamic increment)
- P_{ws} : Pression hydrostatique (Hydrostatic pressure)
- P_{wd} : Incrément hydrodynamique (Hydrodynamic increment)



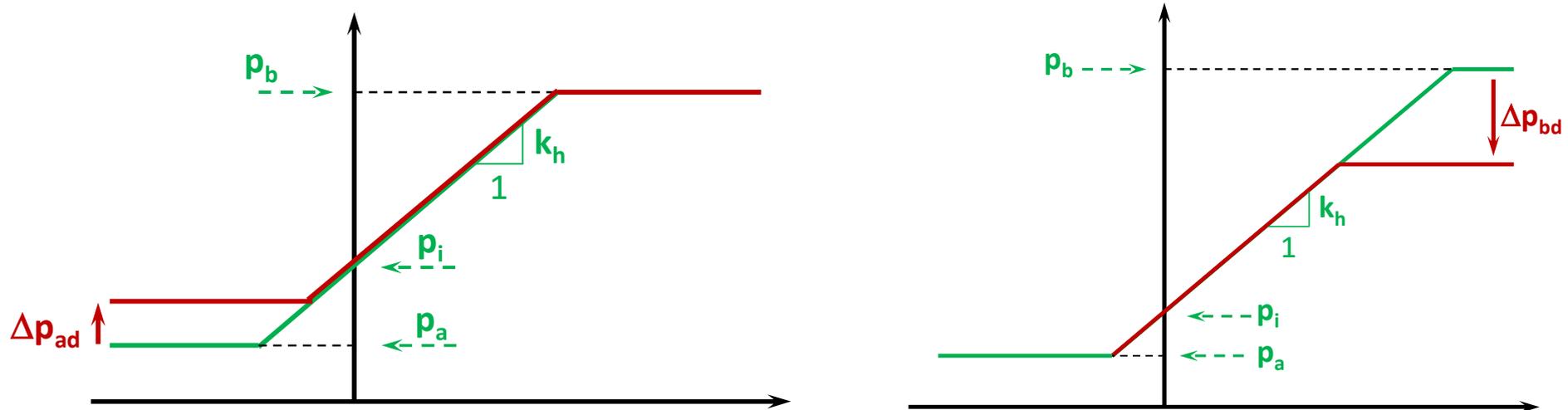
Poussée et butée dynamiques des terres

- Formalisme général – Butée



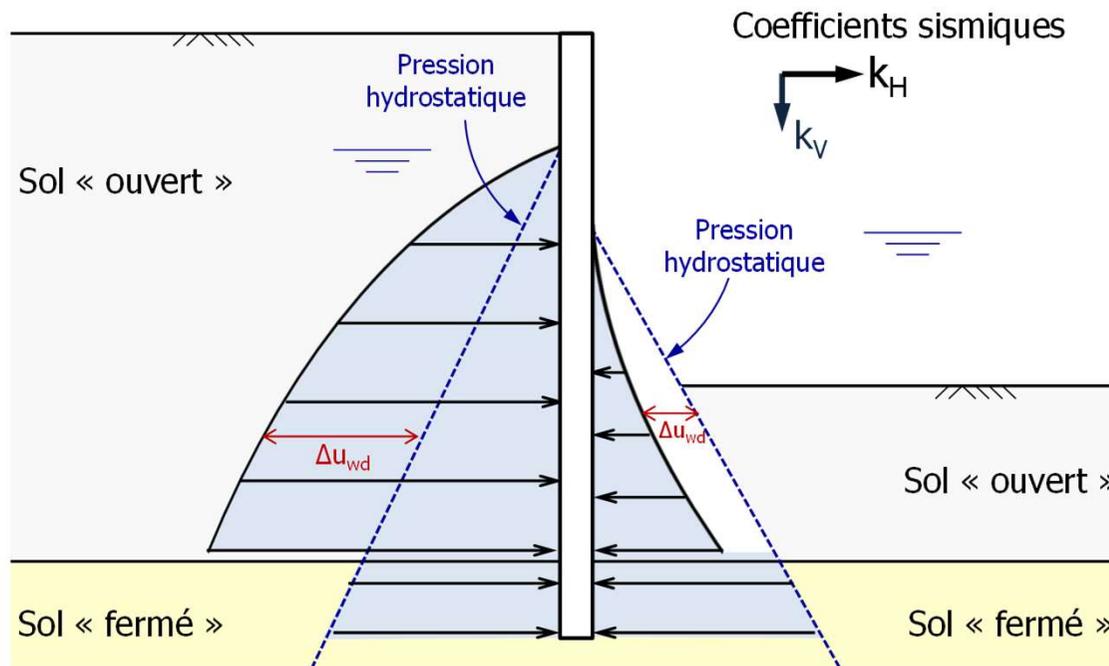
Poussée et butée dynamiques des terres

- Evaluation des incréments de poussée/butée dynamiques
 - ⇒ Plusieurs approches possibles : Mononobé-Okabé (Coulomb), Lancellota (Rankine), Calcul à la rupture
 - ⇒ Toutes couvrent par construction la variation des paliers limites de poussée/butée
 - ⇒ A compléter par un choix approprié du point d'application, la hauteur d'application, rugosité etc.



Poussée et butée dynamiques des terres

- Evaluation des incréments hydro-dynamiques

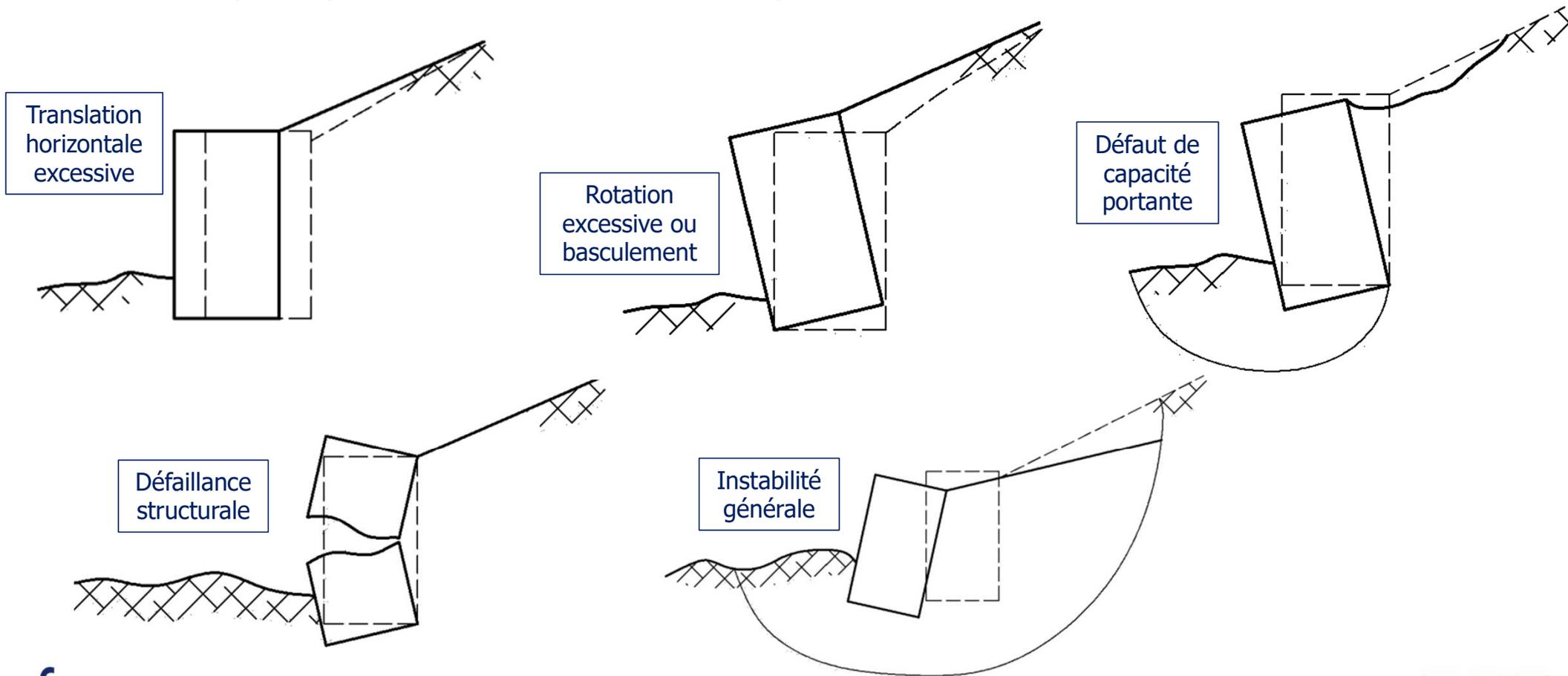


Sur hauteur libre ou sur celle où le terrain est considéré comme ouvert

$$u_w|_{\text{statique+dynamique}} = u_w|_{\text{statique}} \pm \Delta u_{wd} \qquad \Delta u_{wd}(z) = \frac{7}{8} k_H \gamma_w \sqrt{Hz}$$

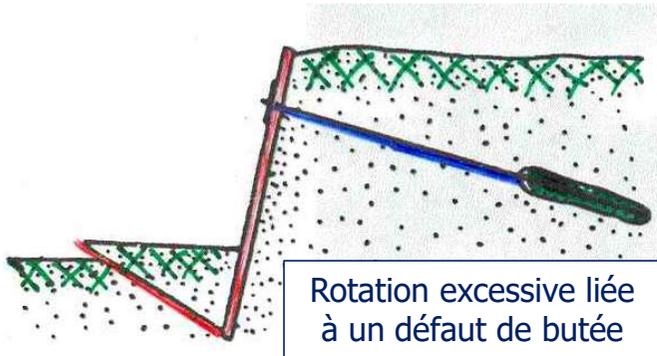
Stabilité sismique d'un ouvrage de soutènement

- Modes de rupture potentiels d'un soutènement gravitaire

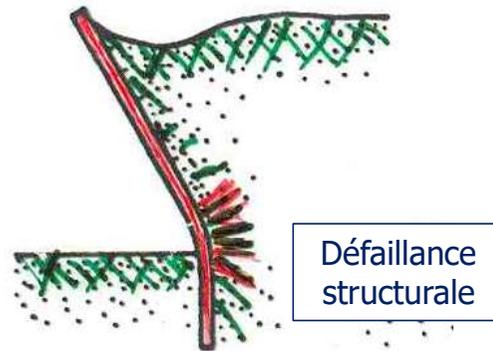


Stabilité sismique d'un ouvrage de soutènement

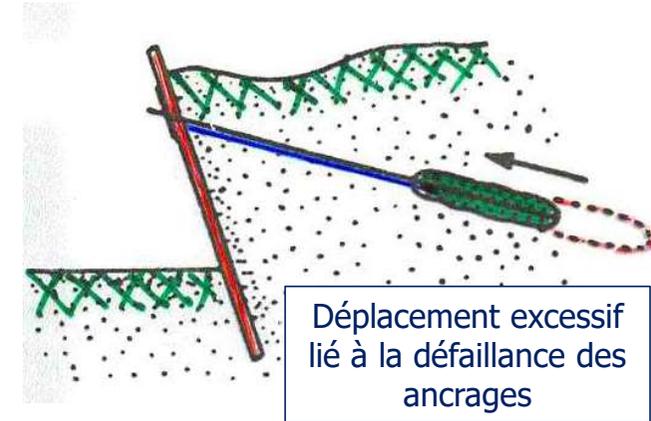
- Modes de rupture potentiels d'un écran de soutènement



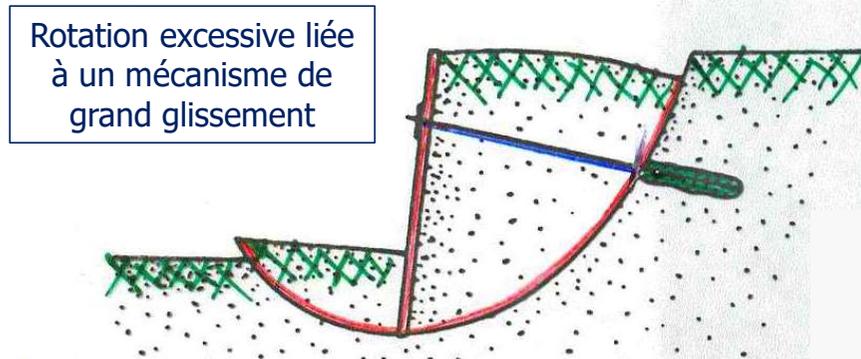
Rotation excessive liée à un défaut de butée



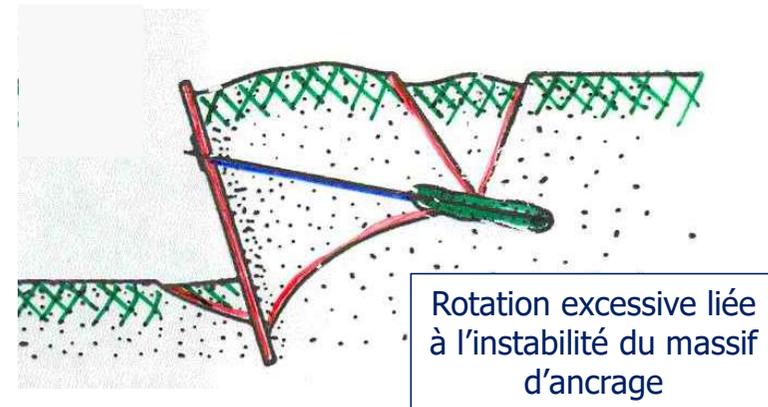
Défaillance structurale



Déplacement excessif lié à la défaillance des ancrages



Rotation excessive liée à un mécanisme de grand glissement



Rotation excessive liée à l'instabilité du massif d'ancrage

Stabilité sismique d'un ouvrage de soutènement

- Formalisme de justification

- ⇒ Un état limite sismique est un état limite pour lequel il y a apparition de déplacements irréversibles d'une amplitude inacceptable. Cela peut se présenter sous la forme d'un déplacement absolu (ex. tassement ou translation excessive) ou différentiel (rotation ou distorsion excessives)
- ⇒ Le déplacement acceptable par l'ouvrage dépend de son utilisation, son importance (critères de performance), de sa constitution et des conditions d'interaction avec d'autres ouvrages
- ⇒ L'état limite sismique peut être vérifié « explicitement » par des **analyses « en déplacement »** (modèle de bloc rigide, modèle dynamique non linéaire etc.) visant à quantifier l'amplitude des déplacements induits et en vérifier l'acceptabilité vis-à-vis de l'ouvrage projeté
- ⇒ Dans la pratique courante, il est souvent fait recours à des formalismes de justification « **pseudo-statiques** » comparant des actions et des résistances. Il s'agit d'un moyen « détourné » de couvrir lesdits déplacements irréversibles (rôle du facteur « r » notamment, des facteurs partiels etc.)

⇒ Mise en œuvre pratique illustrée lors du webinaire du 10 Mai 2022

Sommaire

Partie I – 12 Avril 2022 de 10h30 à 12h30

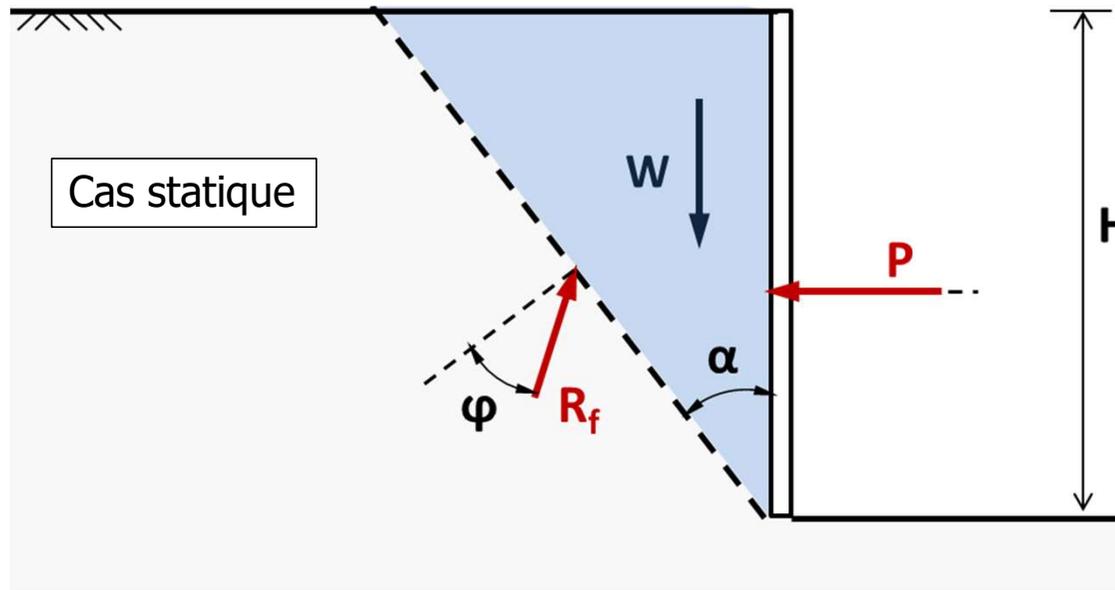
- Stratégie de dimensionnement sous séisme
- Evaluation des poussées et butées dynamiques
- REX post-séisme en milieux urbain et maritime

Evaluation des poussées et butées dynamiques

- Approches globales
 - ⇒ Modèle de Mononobé-Okabé (1924) = généralisation du modèle de Coulomb
 - ⇒ Calcul à la rupture = approche cinématique par l'extérieur (Salençon, 1983)
- Approches locales
 - ⇒ Modèle de Lancellota (2002) = généralisation du modèle de Rankine
 - ⇒ Utilisation des abaques de Caquot Kérisel avec gravité modifiée

Modèle de Mononobé-Okabé

- Une généralisation du modèle de Coulomb (18^e siècle) – sol frottant



$$\begin{cases} P(\alpha) = \frac{W(\alpha)}{\tan(\alpha + \varphi)} \\ W(\alpha) = \tan\alpha \frac{\gamma H^2}{2} \end{cases}$$

On cherche α telle que P soit maximale

Modèle de Mononobé-Okabé

- Une généralisation du modèle de Coulomb (18^e siècle) – sol frottant

Gam (kN/m ³)	Phi (°)	Hauteur (m)
20	30	10

Coin (alpha) [°]	W* [kN/ml]	P [kN/ml]
5	87	125
10	176	210
15	268	268
20	364	305
25	466	327
30	577	333
35	700	327
40	839	305
45	1000	268
50	1192	210
55	1428	125
60	1732	0
65	2145	-188
70	2747	-484
75	3732	-1000
80	5671	-2064
85	11430	-5330

Gam (kN/m ³)	Phi (°)	Hauteur (m)
20	40	10

Coin (alpha) [°]	W* [kN/ml]	P [kN/ml]
5	87	87
10	176	148
15	268	188
20	364	210
25	466	217
30	577	210
35	700	188
40	839	148
45	1000	87
50	1192	0
55	1428	-125
60	1732	-305
65	2145	-575
70	2747	-1000
75	3732	-1740
80	5671	-3274
85	11430	-8003

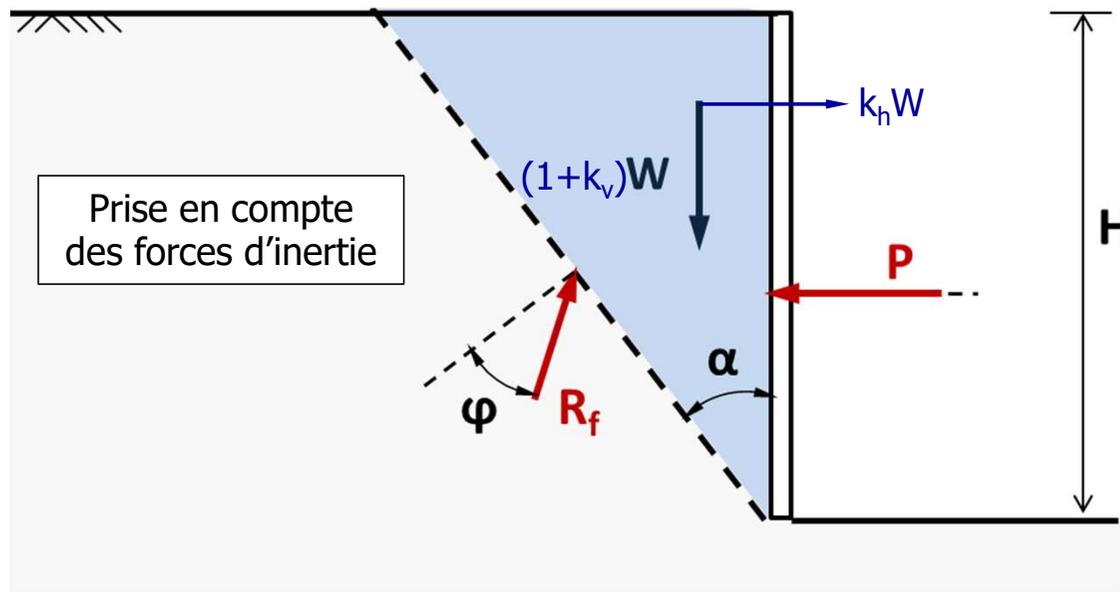
Gam (kN/m ³)	Phi (°)	Hauteur (m)
20	20	10

Coin (alpha) [°]	W* [kN/ml]	P [kN/ml]
5	87	188
10	176	305
15	268	383
20	364	434
25	466	466
30	577	484
35	700	490
40	839	484
45	1000	466
50	1192	434
55	1428	383
60	1732	305
65	2145	188
70	2747	0
75	3732	-327
80	5671	-1000
85	11430	-3063

Balayage par pas de 5° sur α

Modèle de Mononobé-Okabé

- Une généralisation du modèle de Coulomb (18^e siècle) – sol frottant



$$\begin{cases} P(\alpha) = \frac{k_h}{1+k_v} W^* + \frac{W^*}{\tan(\alpha + \phi)} \\ W^* = \tan\alpha \frac{(1+k_v)\gamma H^2}{2} \end{cases}$$

On cherche α telle que P soit maximale

Modèle de Mononobé-Okabé

- Une généralisation du modèle de Coulomb (18^e siècle) – sol frottant

kh	0.2	
kv	0.1	
Gam (kN/m3)	Phi (°)	Hauteur (m)
20	30	10

Coin (alpha) [°]	W* [kN/ml]	P [kN/ml]
5	96	155
10	194	266
15	295	348
20	400	409
25	513	452
30	635	482
35	770	499
40	923	504
45	1100	495
50	1311	470
55	1571	423
60	1905	346
65	2359	223
70	3022	17
75	4105	-354
80	6238	-1136
85	12573	-3577

kh	0.2	
kv	0.1	
Gam (kN/m3)	Phi (°)	Hauteur (m)
20	40	10

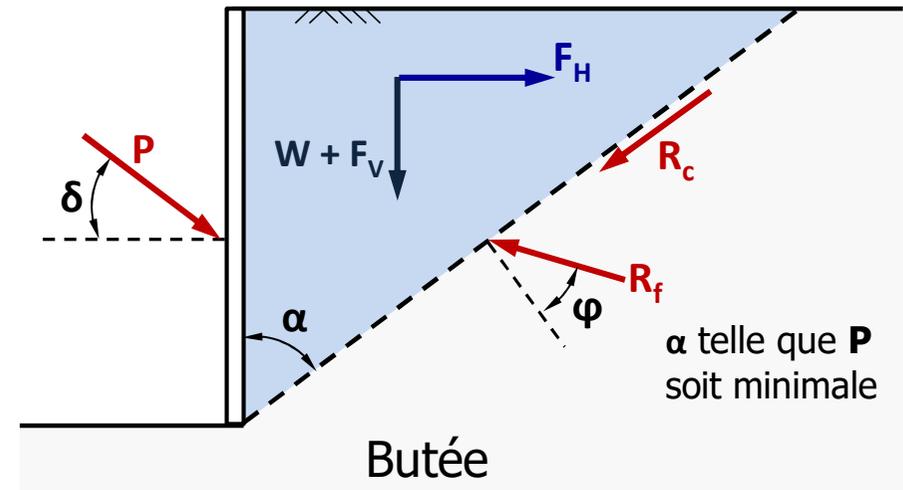
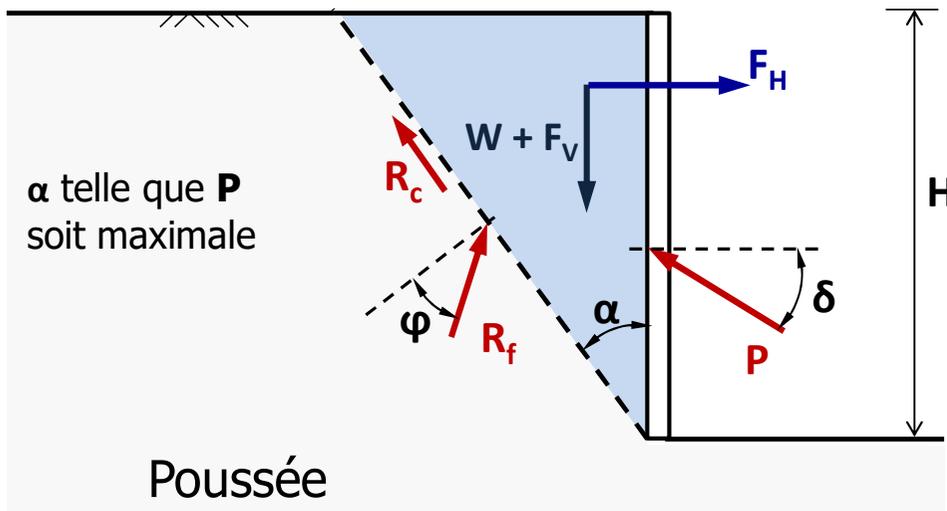
Coin (alpha) [°]	W* [kN/ml]	P [kN/ml]
5	96	114
10	194	198
15	295	260
20	400	304
25	513	332
30	635	347
35	770	346
40	923	331
45	1100	296
50	1311	238
55	1571	148
60	1905	10
65	2359	-203
70	3022	-551
75	4105	-1168
80	6238	-2467
85	12573	-6518

kh	0.2	
kv	0.1	
Gam (kN/m3)	Phi (°)	Hauteur (m)
20	20	10

Coin (alpha) [°]	W* [kN/ml]	P [kN/ml]
5	96	224
10	194	371
15	295	475
20	400	550
25	513	606
30	635	648
35	770	679
40	923	701
45	1100	713
50	1311	715
55	1571	707
60	1905	682
65	2359	635
70	3022	549
75	4105	387
80	6238	34
85	12573	-1083

Modèle de Mononobé-Okabé

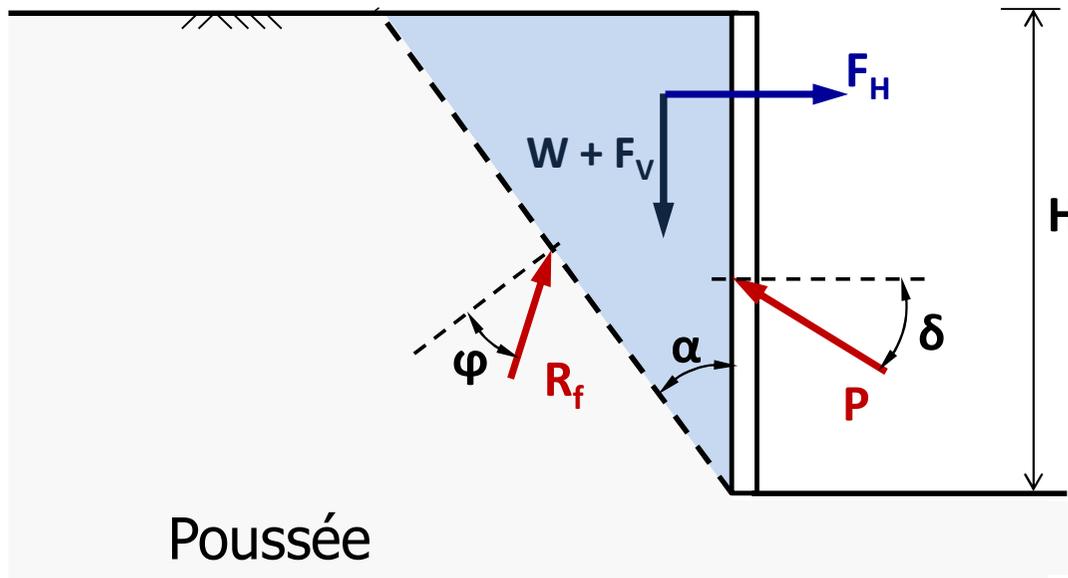
- Une généralisation du modèle de Coulomb (18^e siècle) – Cas général



- ⇒ Mécanismes de poussée et butée
- ⇒ Prise en compte de la rugosité (δ)
- ⇒ Prise en compte du terme de cohésion (R_c)
- ⇒ Mêmes limitations qu'en conditions statiques

Modèle de Mononobé-Okabé

- Solution analytique pour terrain frottant ($\phi \neq 0, c = 0$)



$$P_{ad} = K_{ad}P_0$$

$$P_0 = \frac{1}{2}(1 + k_v)\gamma H^2$$

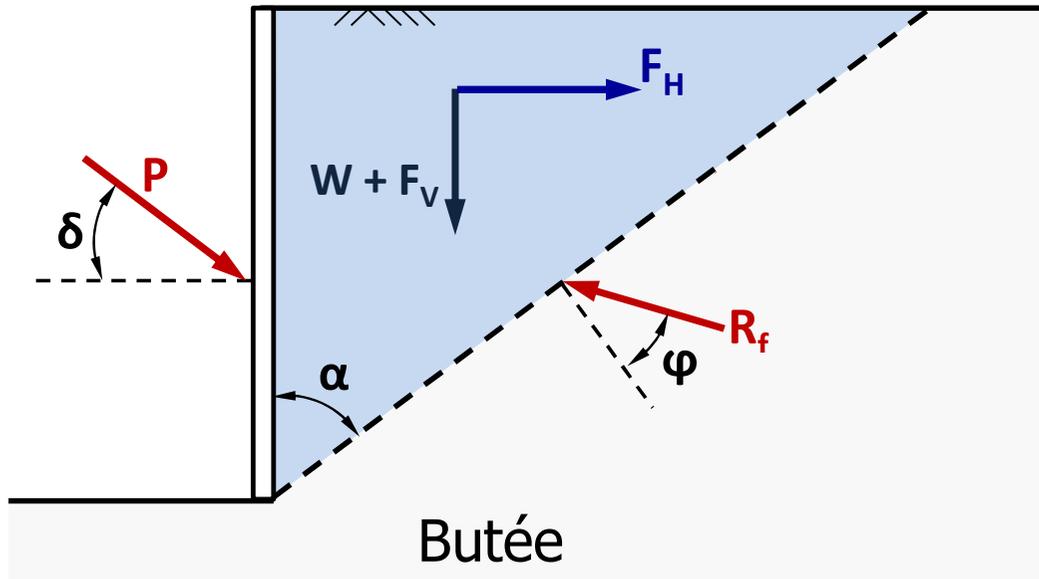
Pour $\delta = 0$

$$K_{ad} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos^2\theta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi)\sin(\phi - \theta)}{\cos(\theta)}} \right]^2}$$

avec $\tan\theta = \frac{k_h}{1 + k_v}$

Modèle de Mononobé-Okabé

- Solution analytique pour terrain frottant ($\varphi \neq 0, c = 0$)



$$P_{bd} = K_{pd} P_0$$

$$P_0 = \frac{1}{2} (1 + k_v) \gamma H^2$$

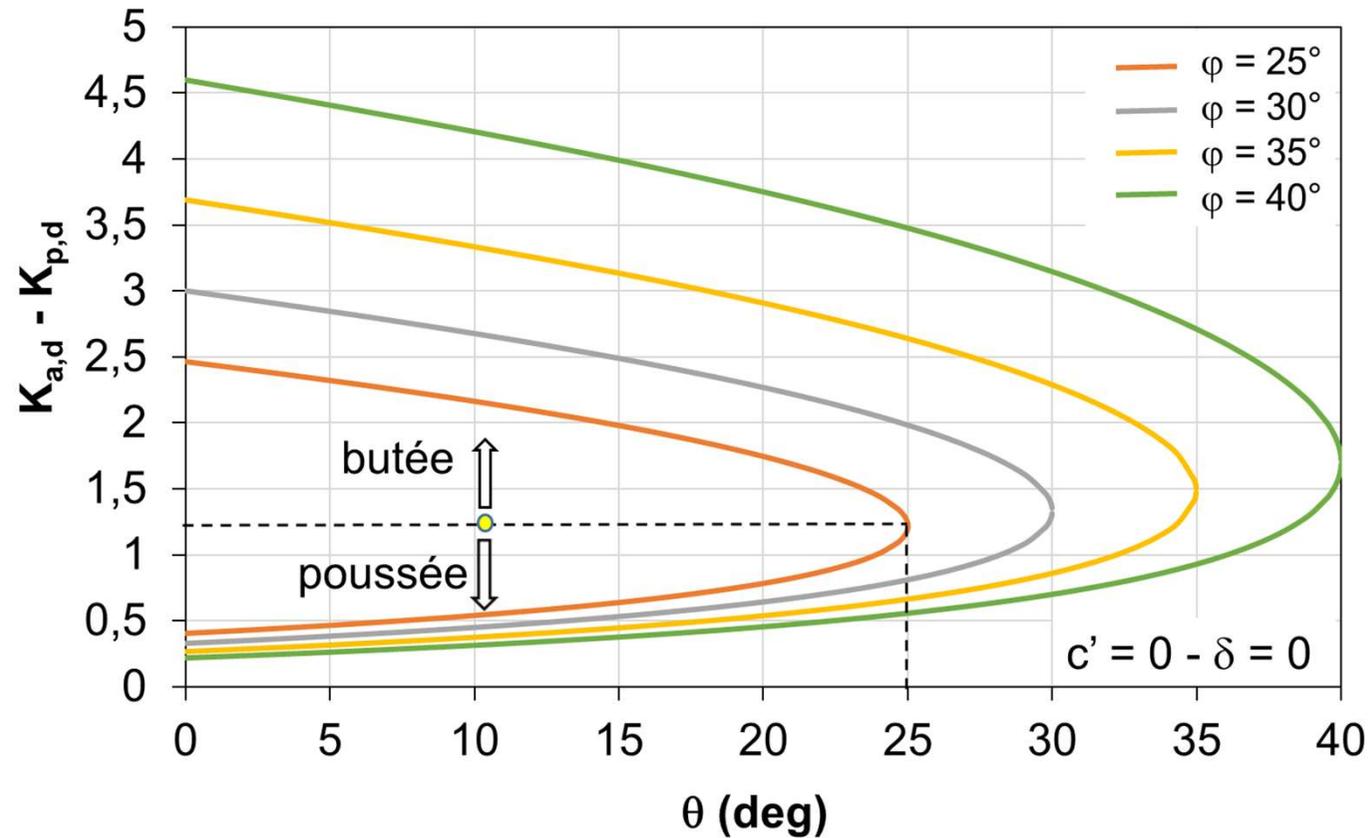
Pour $\delta = 0$

$$K_{pd} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos^2\theta \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi)\sin(\phi - \theta)}{\cos(\theta)}} \right]^2}$$

avec $\tan\theta = \frac{k_h}{1 + k_v}$

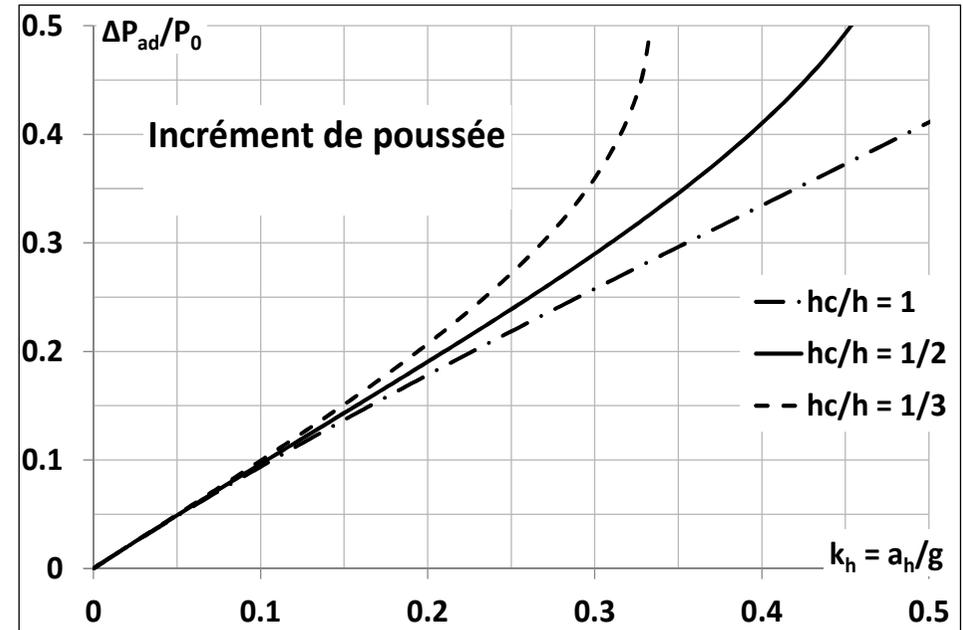
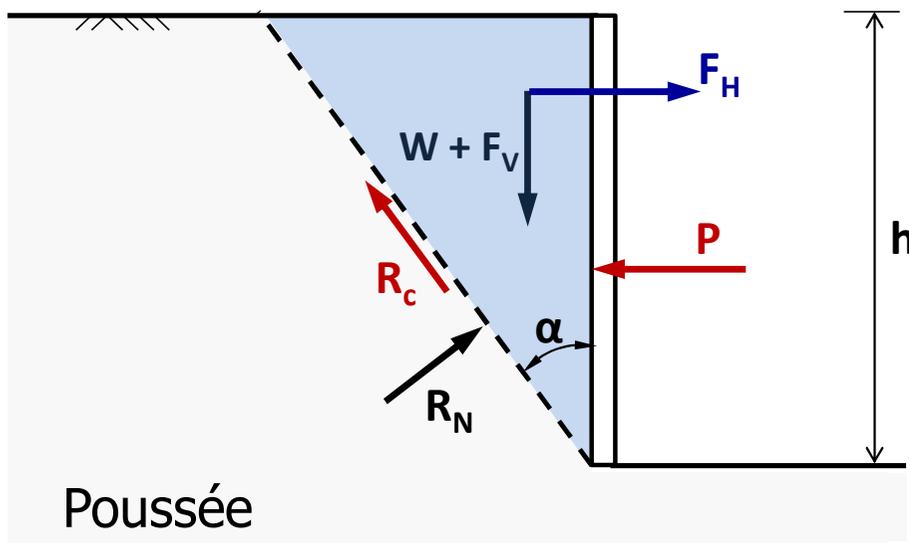
Modèle de Mononobé-Okabé

- Solution analytique pour terrain frottant ($\varphi \neq 0, c = 0$)



Modèle de Mononobé-Okabé

- Solution analytique pour terrain cohérent ($\varphi = 0, c \neq 0$)

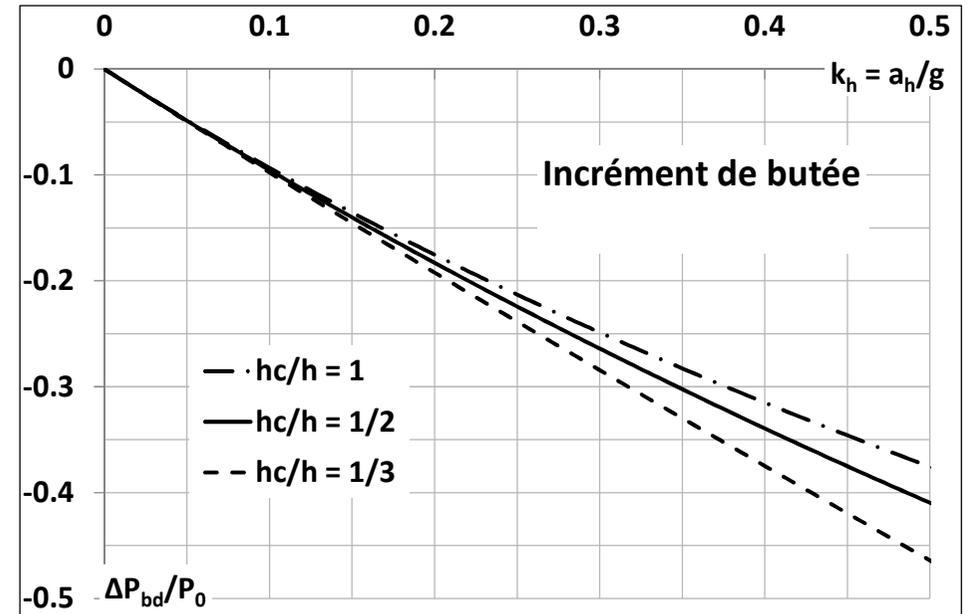
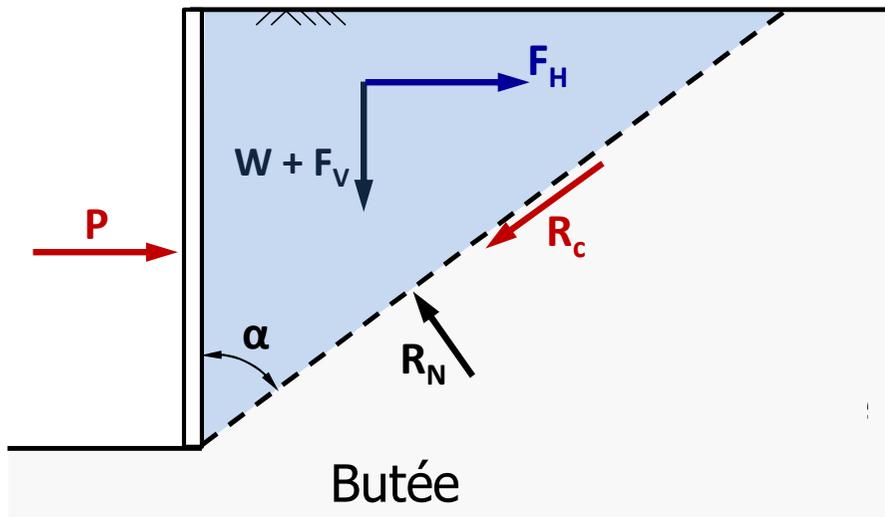


$$\frac{\Delta P_{ad}}{P_0} = 2 \frac{h_c}{h} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{h}{h_c} \tan \theta} \right)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} (1 + k_v) \gamma H^2 \quad h_c = \frac{2c}{\gamma (1 + k_v)} \quad \tan \theta = \frac{k_h}{1 + k_v}$$

Modèle de Mononobé-Okabé

- Solution analytique pour terrain cohérent ($\varphi = 0, c \neq 0$)

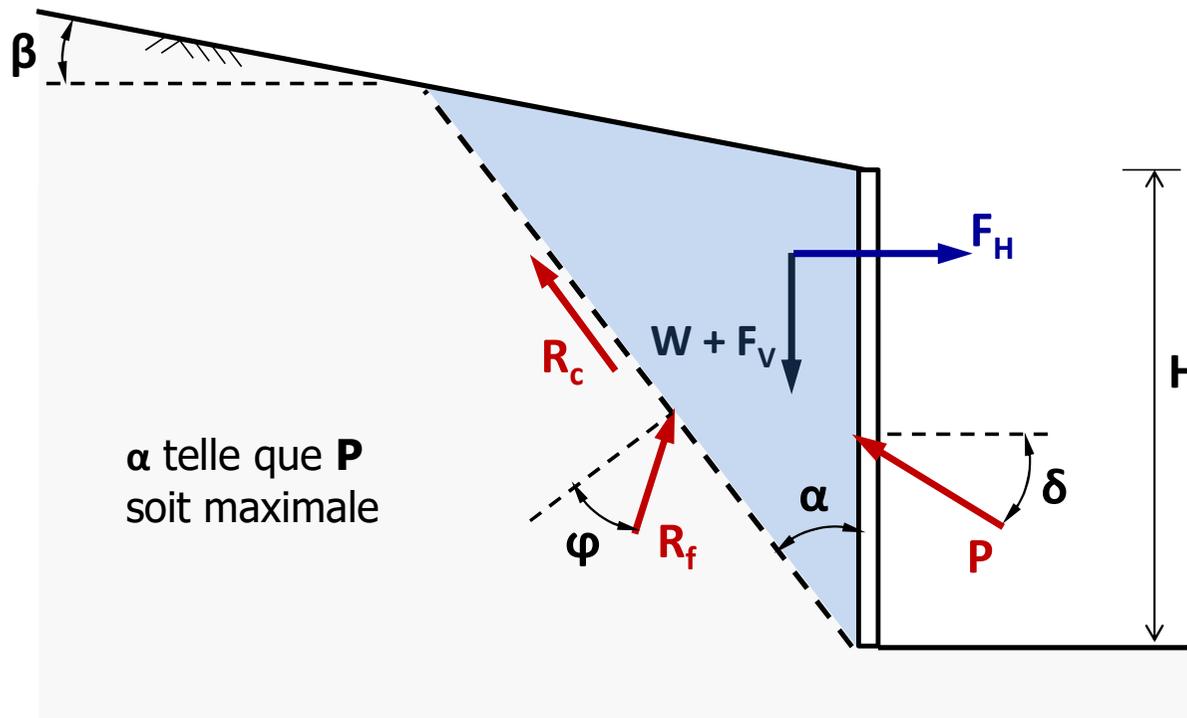


$$\frac{\Delta P_{bd}}{P_0} = 2 \frac{h_c}{h} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{h}{h_c} \tan \theta} \right)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} (1 + k_v) \gamma H^2 \quad h_c = \frac{2c}{\gamma(1 + k_v)} \quad \tan \theta = \frac{k_h}{1 + k_v}$$

Modèle de Mononobé-Okabé

- Solution pour terrain de comportement intermédiaire ($\varphi \neq 0, c \neq 0$)



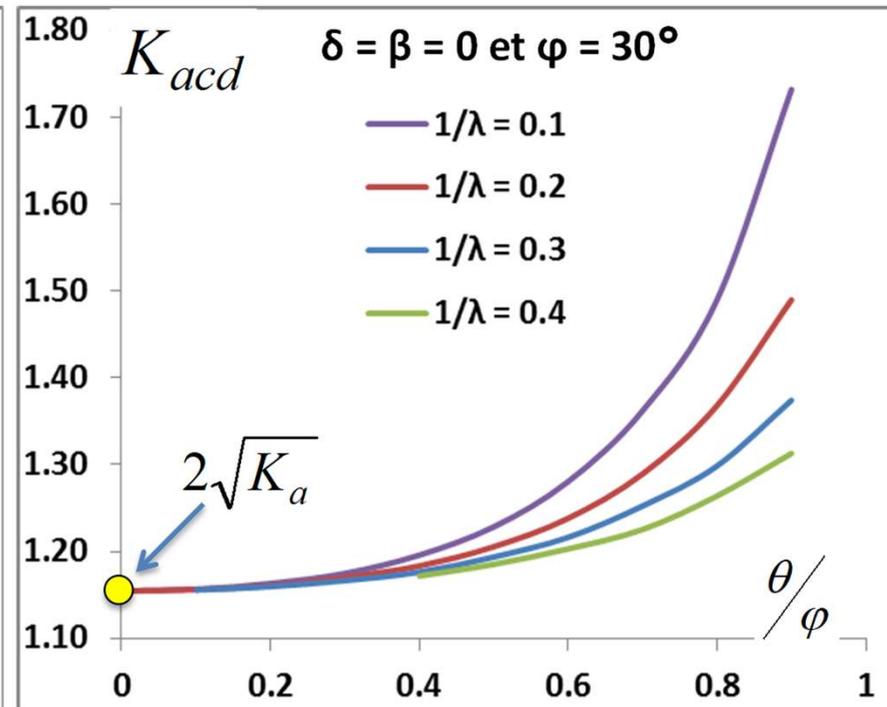
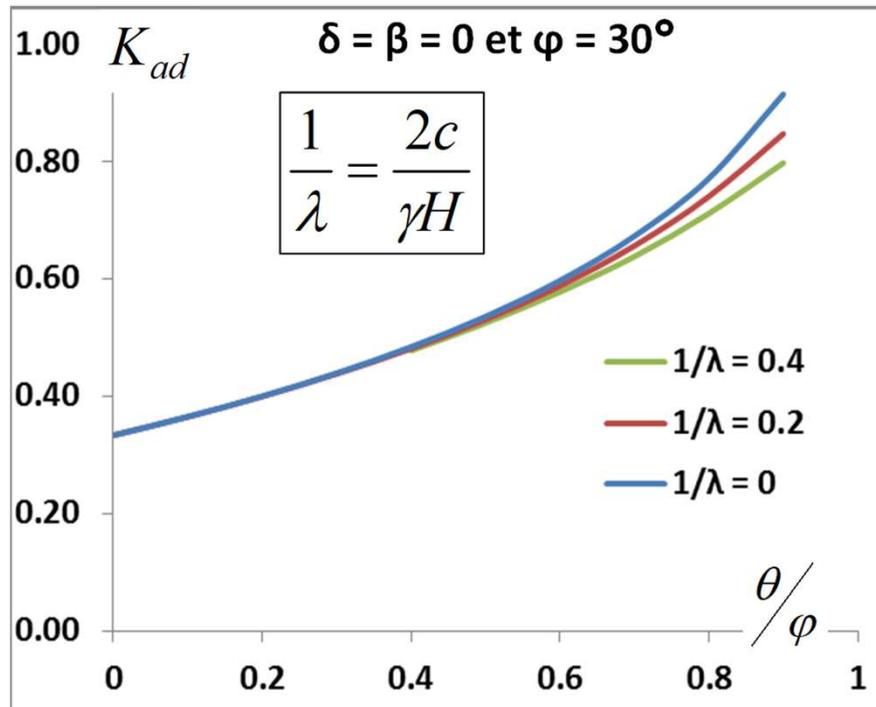
$$P_{ad} = K_{ad} \cdot P_0 - K_{acd} \cdot cH$$

$$P_0 = \frac{1}{2} (1 + k_v) \gamma H^2$$

Modèle de Mononobé-Okabé

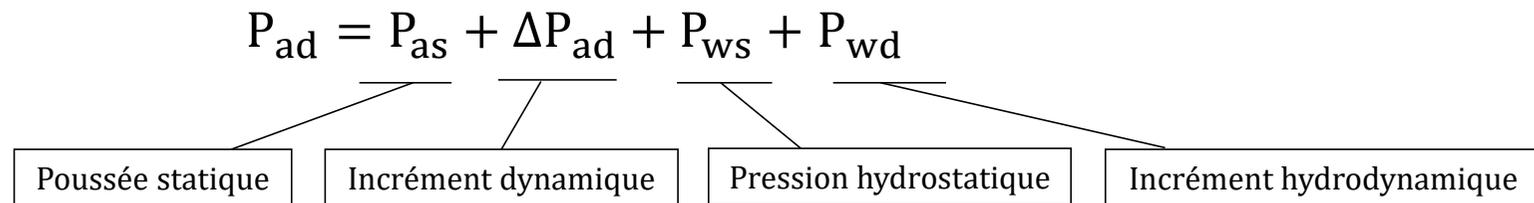
- Solution pour terrain de comportement intermédiaire ($\varphi \neq 0, c \neq 0$)

$$P_{ad} = K_{ad} \cdot P_0 - K_{acd} \cdot cH \qquad \tan\theta = \frac{k_h}{1 + k_v}$$



Modèle de Mononobé-Okabé

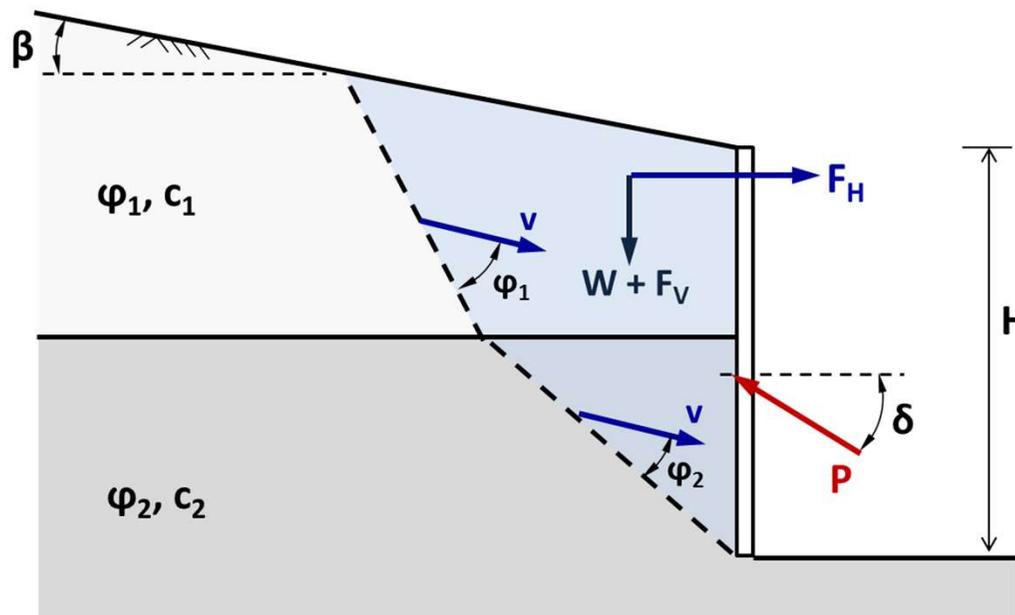
- Prise en compte des effets de « couplage » avec l'eau



	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}	à calculer avec γ et $\tan\theta = k_H/(1+k_V)$	à calculer avec γ' et $\tan\theta = (\gamma/\gamma')k_H/(1+k_V)$	à calculer avec γ' et $\tan\theta = (\gamma_d/\gamma')k_H/(1+k_V)$
P_{wd}	= 0	= 0	$\Delta u_{wd}(z) = \pm \frac{7}{8} k_H \gamma_w \sqrt{Hz}$

Méthode cinématique du calcul à la rupture

- Mise en œuvre pour le cas d'une cinématique translationnelle (surfaces de rupture planes)

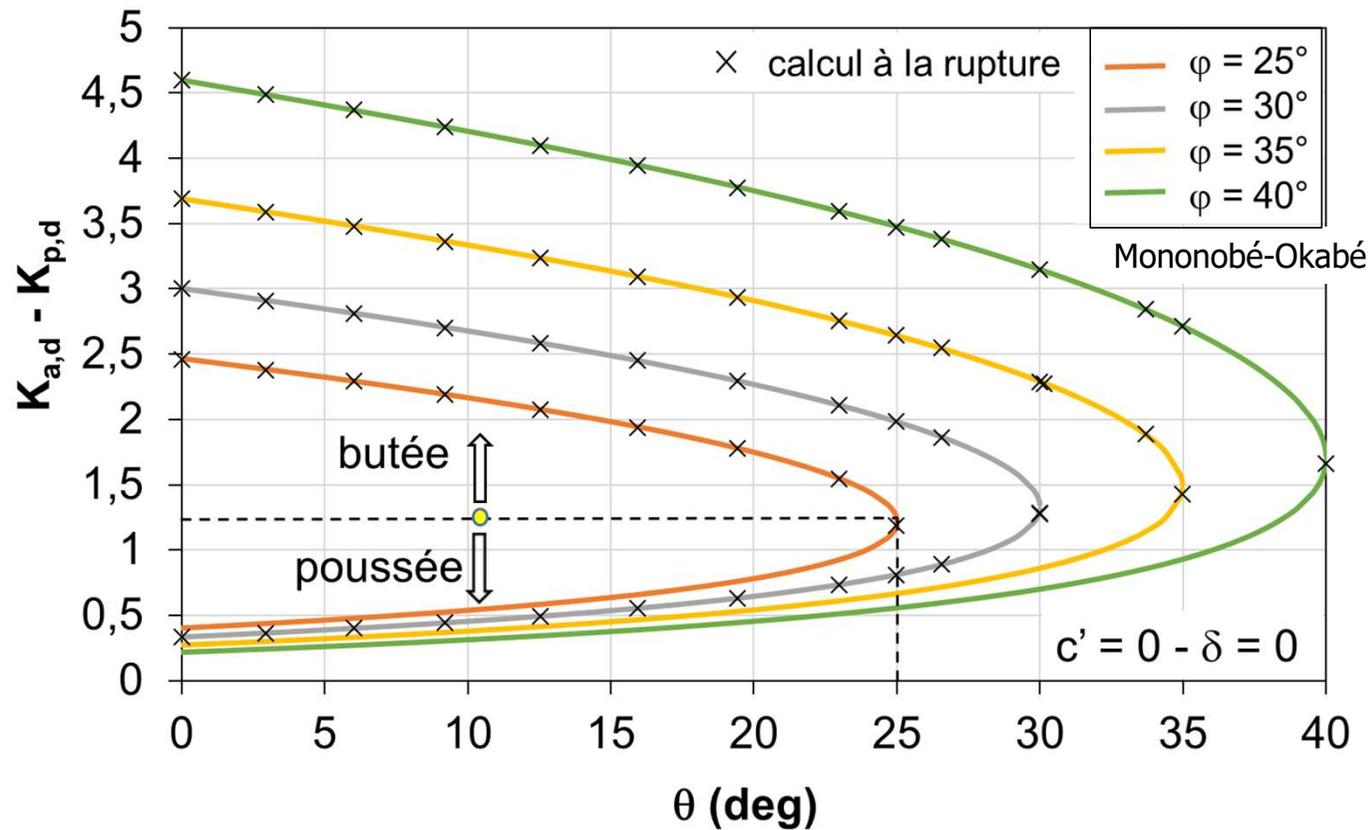


Champs de vitesse v formant un angle α par rapport à l'horizontale

$$\cos(\alpha - \delta) \cdot P(\alpha) = (1 + k_v) \left(1 + \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) W \sin \alpha - \sum R_{ci} \cos \varphi_i$$

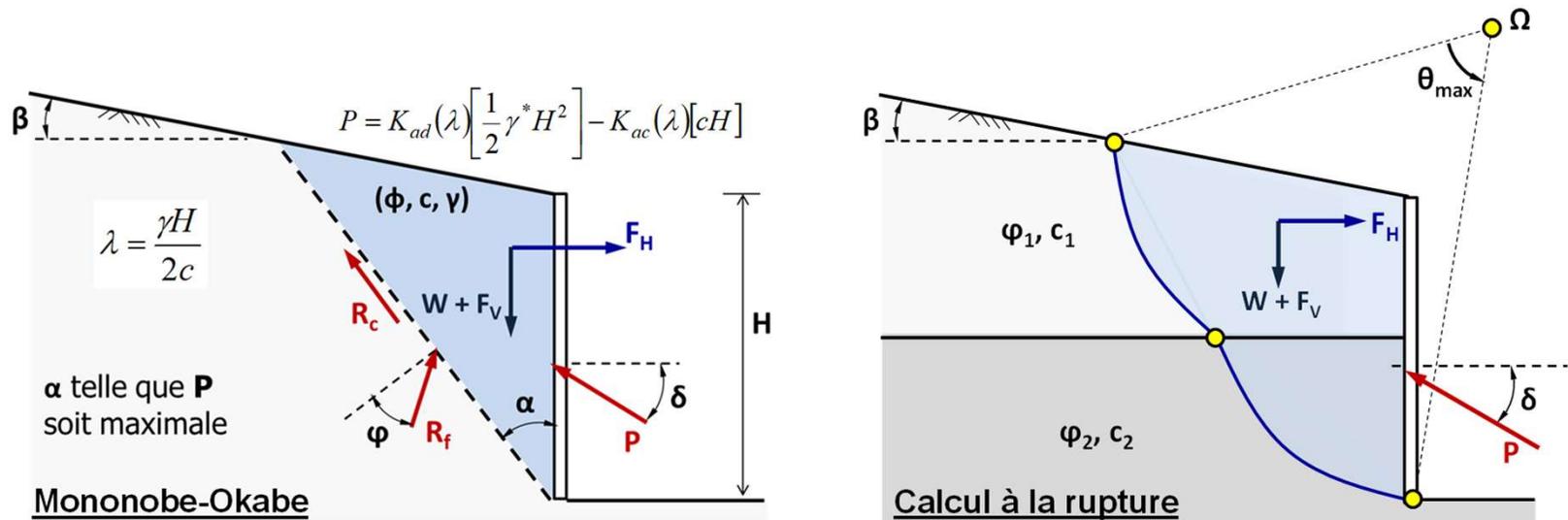
Méthode cinématique du calcul à la rupture

- Comparaison au modèle de Mononobé-Okabé pour un terrain frottant horizontal



Méthode cinématique du calcul à la rupture

- Comparaison au modèle de Mononobé-Okabé

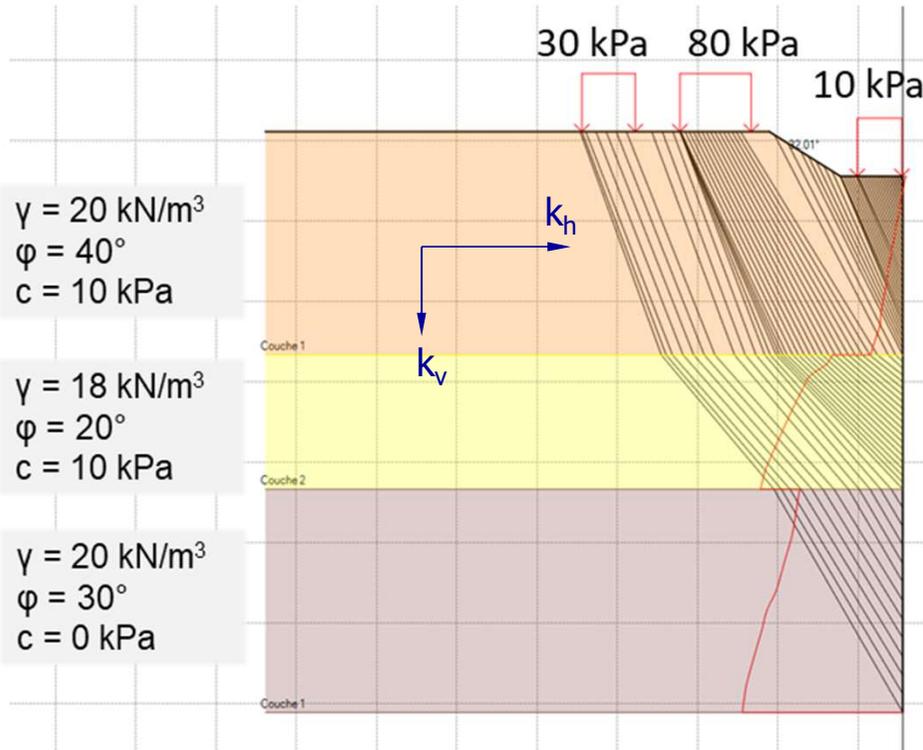


$H = 10 \text{ m}$
 $\delta/\varphi = 0$
 $\theta = 17^\circ$

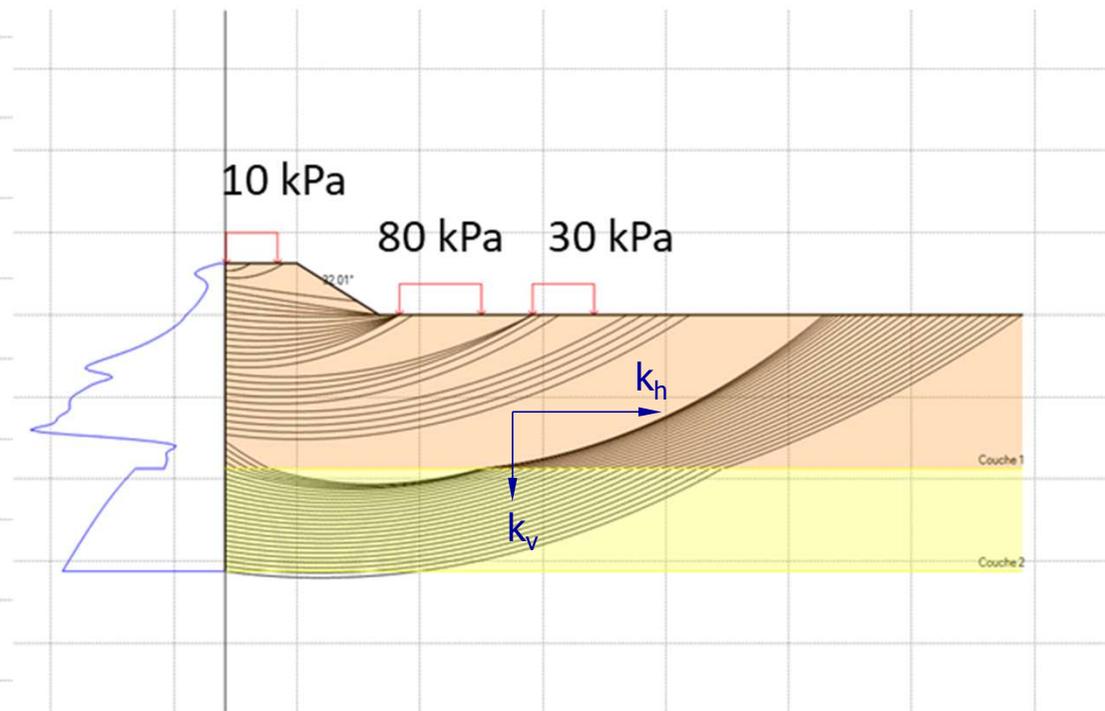
φ (°)	pente talus (°)	cohésion c (kPa)	Mononobe- Okabe	Calcul à la rupture cinématique plane	Calcul à la rupture cinématique rotation ^{nelle}
30	0	0	570 kN/ml	570 kN/ml	575 kN/ml (+01%)
30	0	20	305 kN/ml	305 kN/ml	310 kN/ml (+02%)
30	16	20	450 kN/ml	450 kN/ml	500 kN/ml (+11%)
0	0	50	368 kN/ml	368 kN/ml	450 kN/ml (+22%)

Méthode cinématique du calcul à la rupture

- Capacité à traiter des configurations stratigraphiques complexes



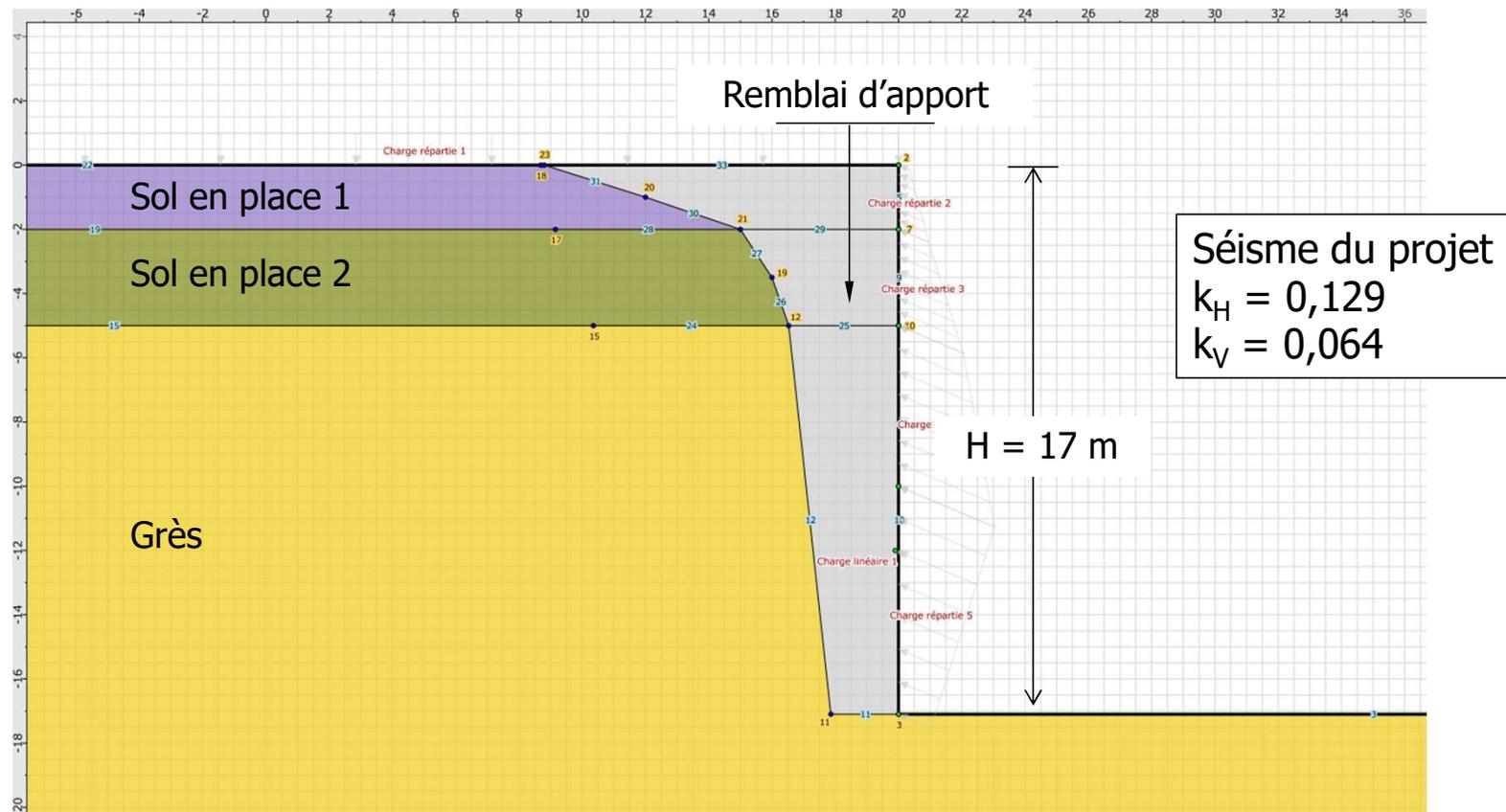
Calage du diagramme de poussée dynamique



Calage du diagramme de butée dynamique

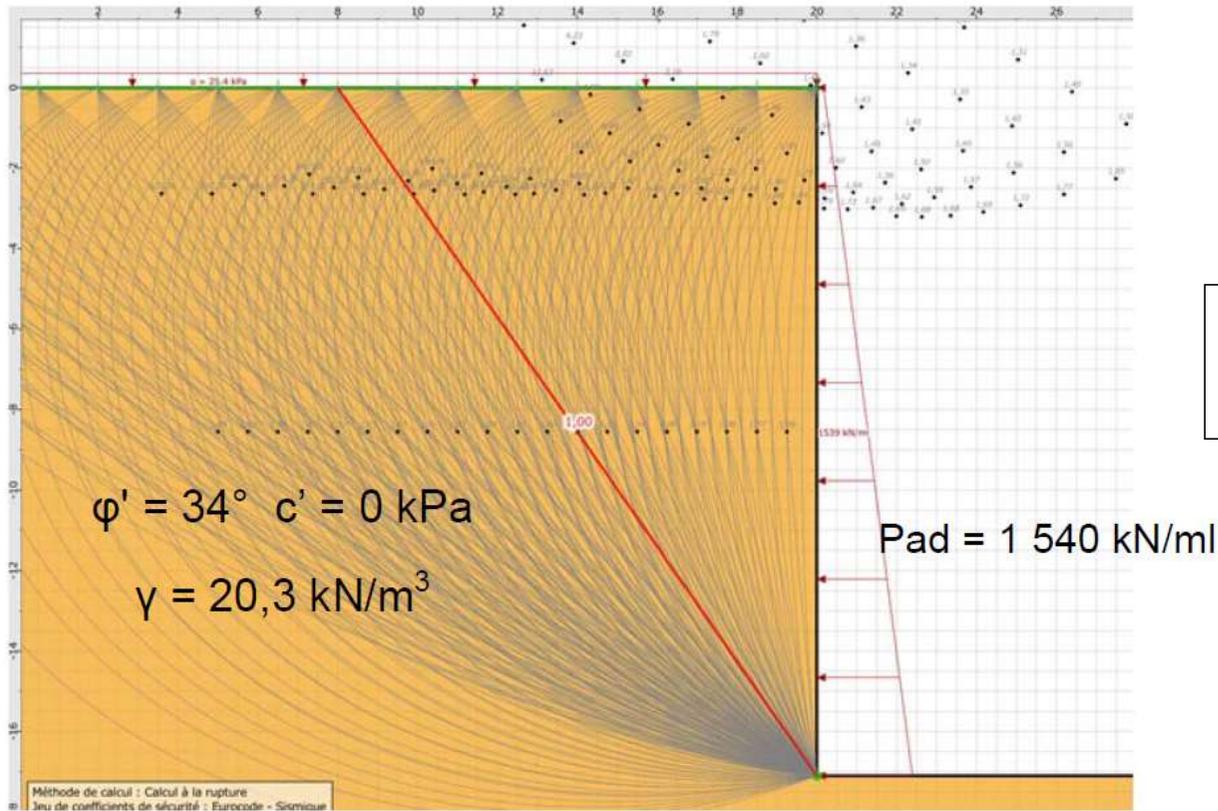
Méthode cinématique du calcul à la rupture

- Exemple d'application : soutènement d'un terrain hétérogène



Méthode cinématique du calcul à la rupture

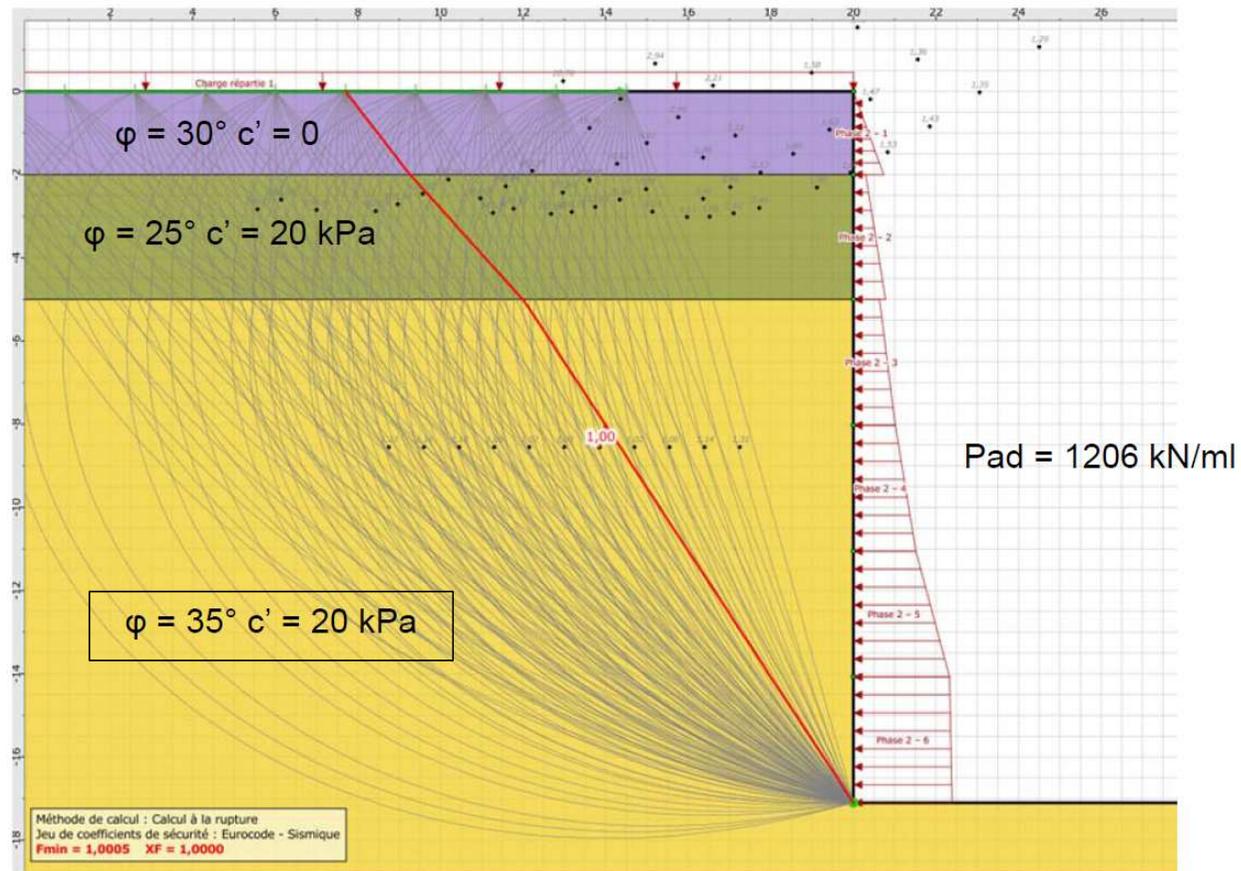
- Exemple d'application : soutènement d'un terrain hétérogène



Poussée avec terrain
« homogénéisé »
dépourvu de cohésion

Méthode cinématique du calcul à la rupture

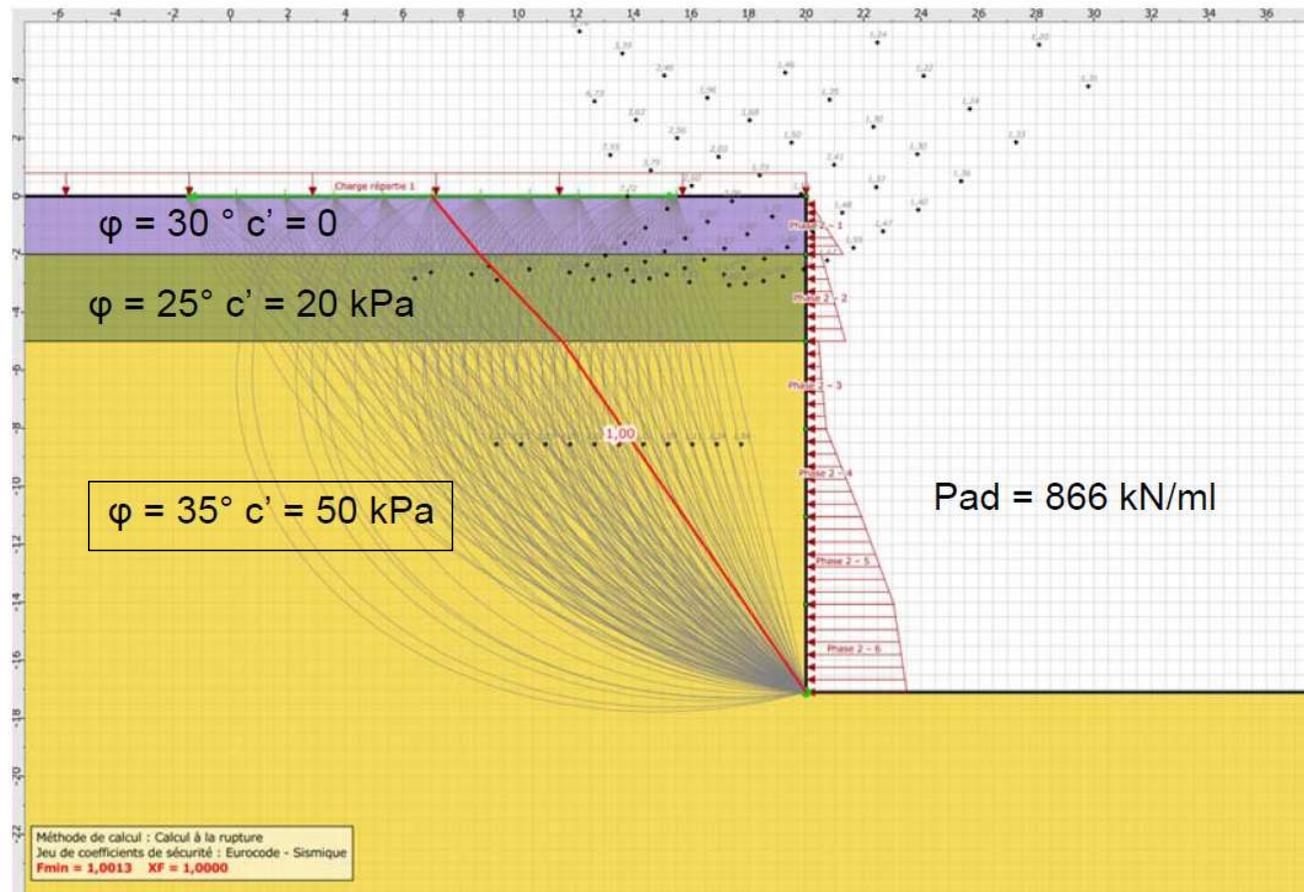
- Exemple d'application : soutènement d'un terrain hétérogène



Terrain en place seul
 Grès avec $c' = 20$ kPa

Méthode cinématique du calcul à la rupture

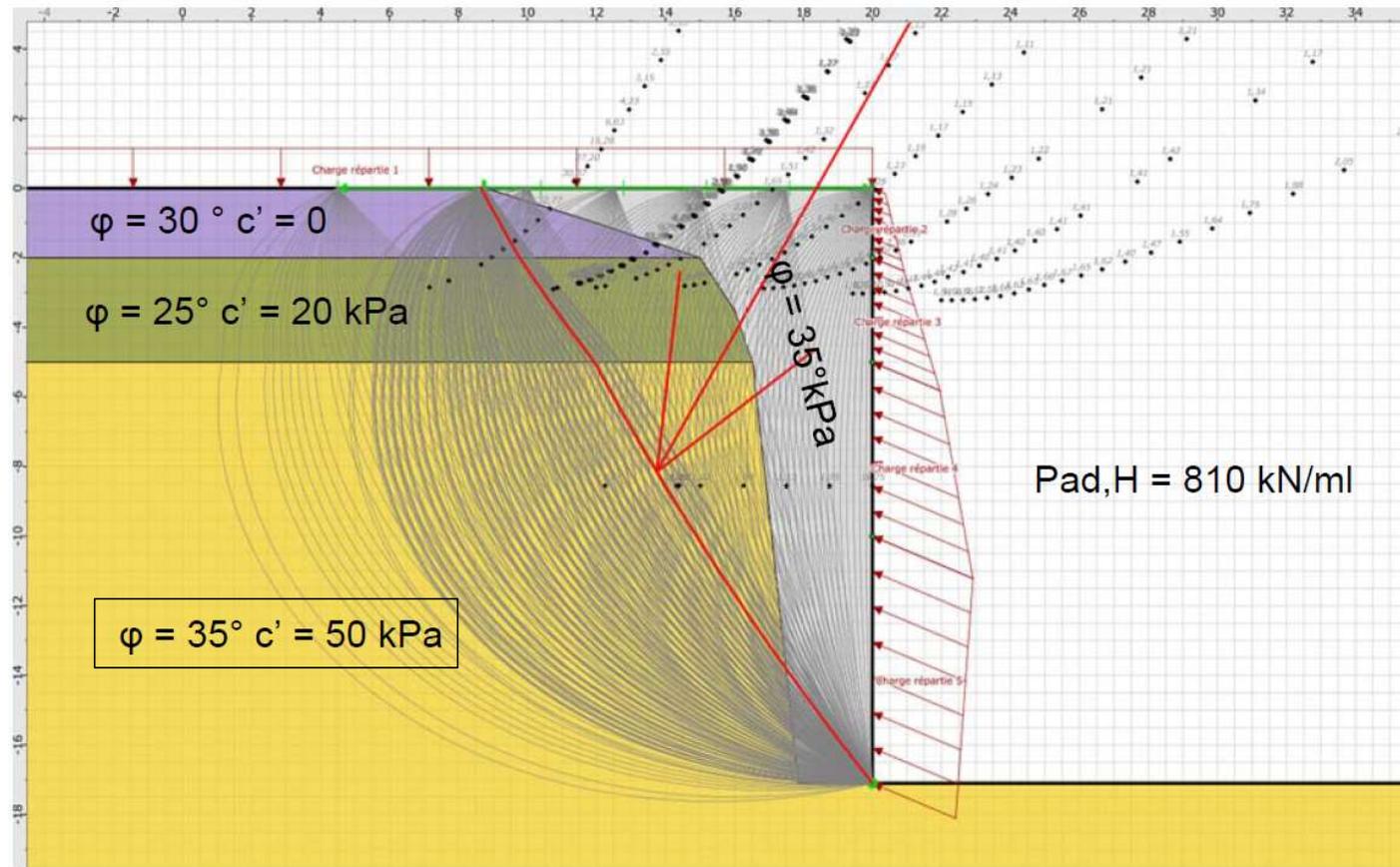
- Exemple d'application : soutènement d'un terrain hétérogène



Terrain en place seul
 Grès avec $c' = 50$ kPa

Méthode cinématique du calcul à la rupture

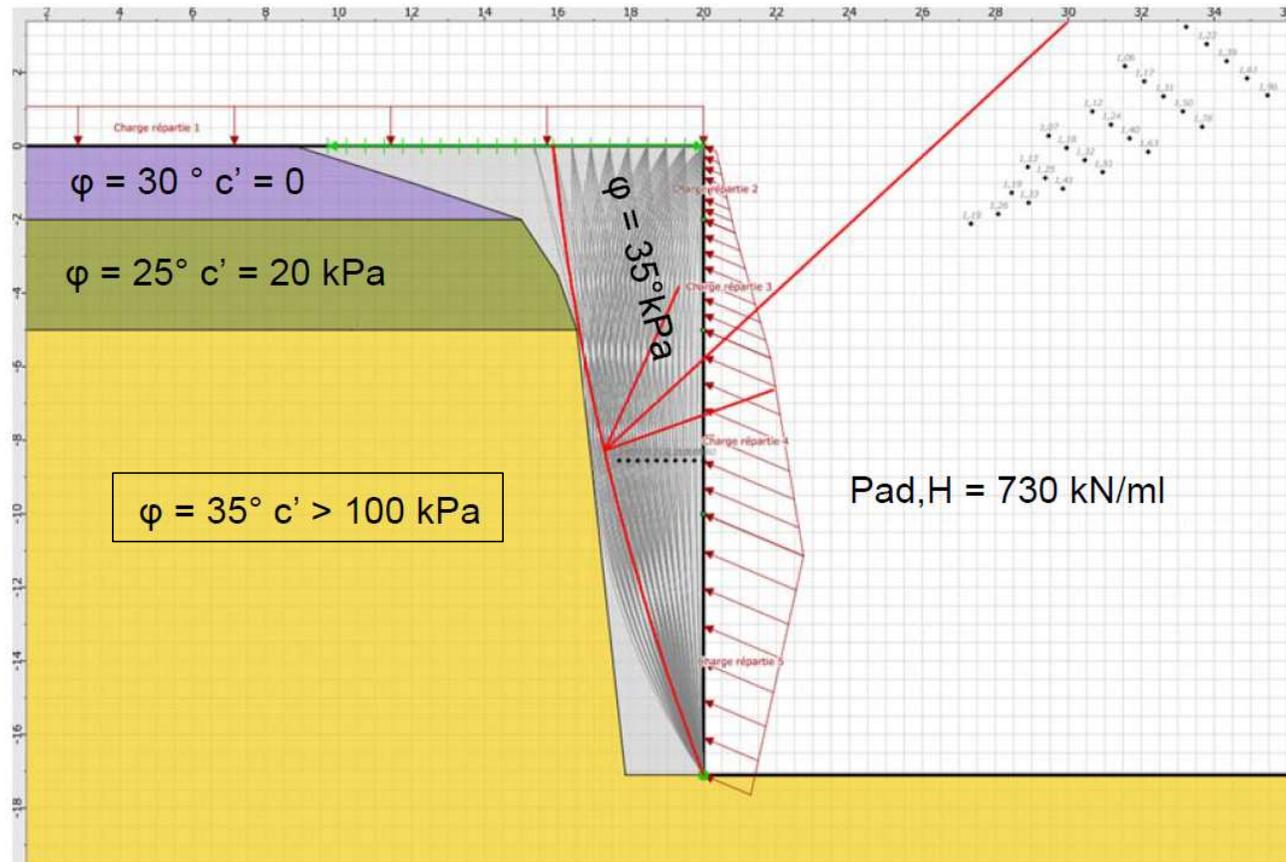
- Exemple d'application : soutènement d'un terrain hétérogène



Configuration réelle
Grès avec $c' = 50 \text{ kPa}$

Méthode cinématique du calcul à la rupture

- Exemple d'application : soutènement d'un terrain hétérogène



Configuration réelle
Grès avec $c' \geq 100$ kPa

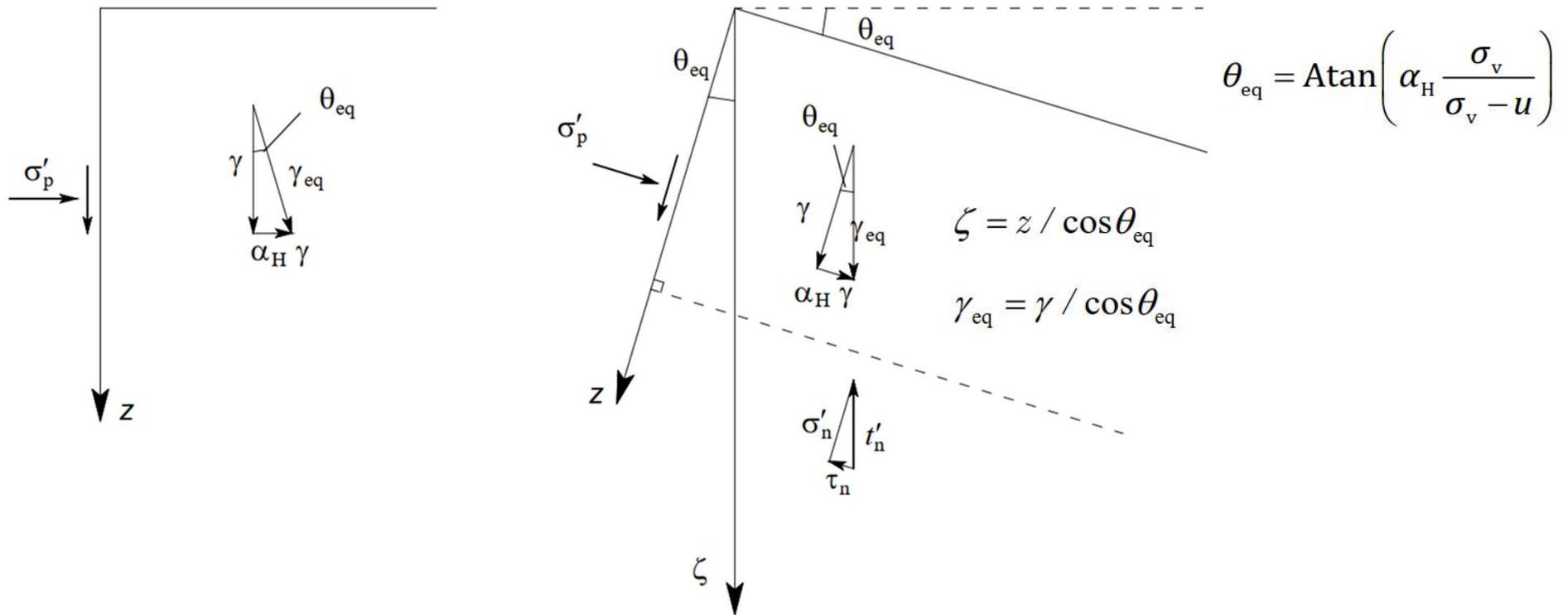
Méthode cinématique du calcul à la rupture

- Exemple d'application : soutènement d'un terrain hétérogène

Synthèse	Cohésion du Grès (kPa)	Rugosité δ/φ	Remblai intercalaire	Poussée dynamique (projetée kN/ml)	Poussée statique (projetée kN/ml)	Incrément dynamique (projetée kN/ml)
Sol homogénéisé	0	0	Non	1 540	1210	330
Multicouche 1	20	0	Non	1 215	920	295
Multicouche 2	50	0	Non	870	580	290
Multicouche 3	50	2/3	Oui $\varphi' = 35^\circ$	810	625	185
Multicouche 4	> 100	2/3	Oui $\varphi' = 35^\circ$	730	625	105

Modèle de Lancellota

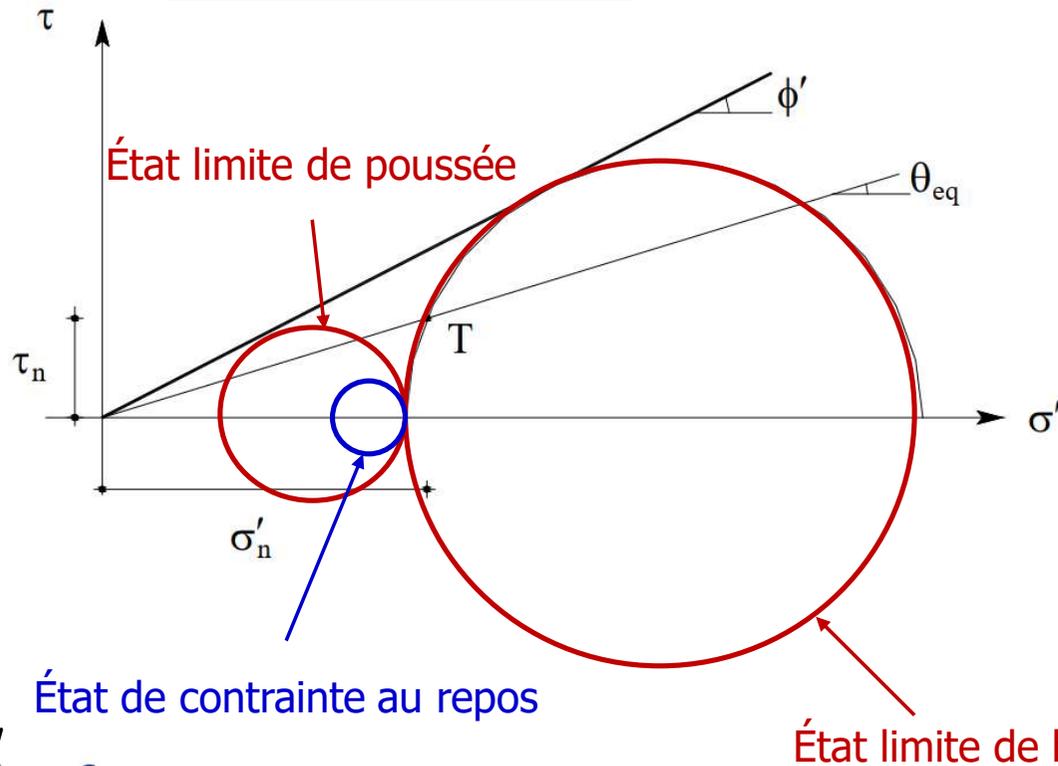
- Une généralisation du modèle de Rankine-Boussinesq avec modification de la gravité



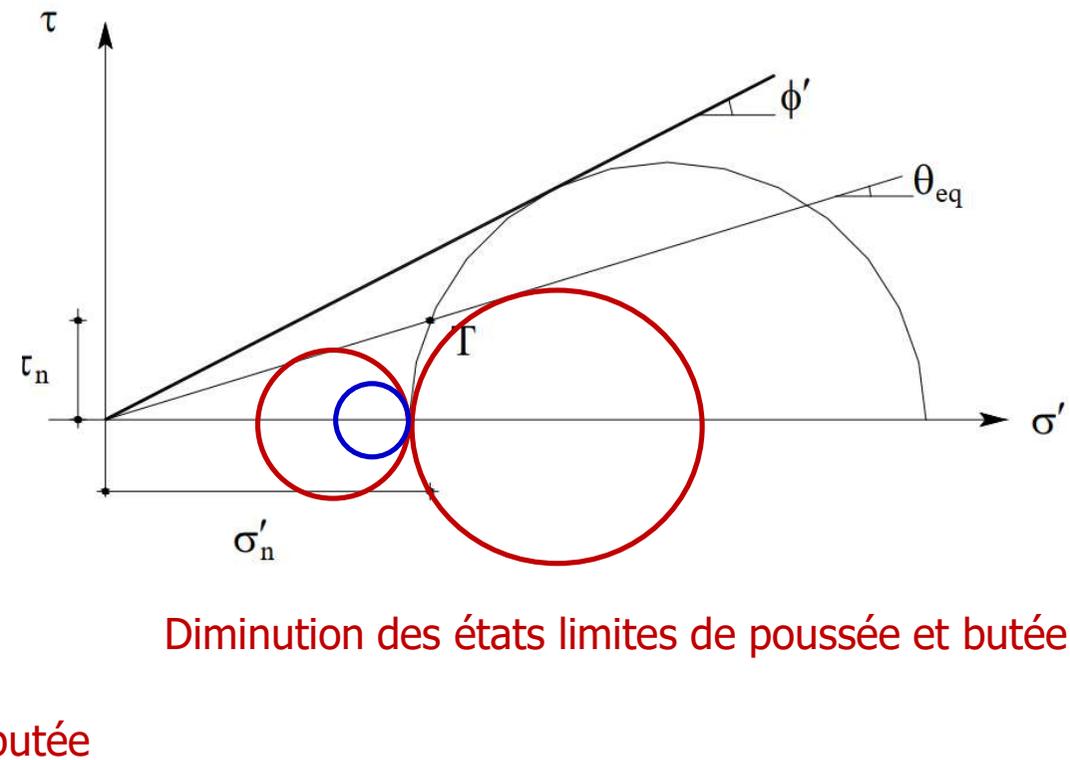
Modèle de Lancellota

- Une généralisation du modèle de Rankine-Boussinesq avec modification de la gravité

En conditions statiques



Avec forces d'inertie



Modèle de Lancellota

- Formalisme en contraintes effectives

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

$$p_{bd} = u + K_{pd}(\sigma_v - u) + 2c'\sqrt{K_{pd}}$$

$$\theta_{eq} = A \tan \left(\alpha_H \frac{\sigma_v}{\sigma_v - u} \right)$$

$$K_{ad} = \left(\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \theta_{eq} + \sqrt{(\sin \varphi)^2 - (\sin \theta_{eq})^2}} \right) \frac{e^{-2\psi_A \tan \varphi}}{\cos \theta_{eq}}$$

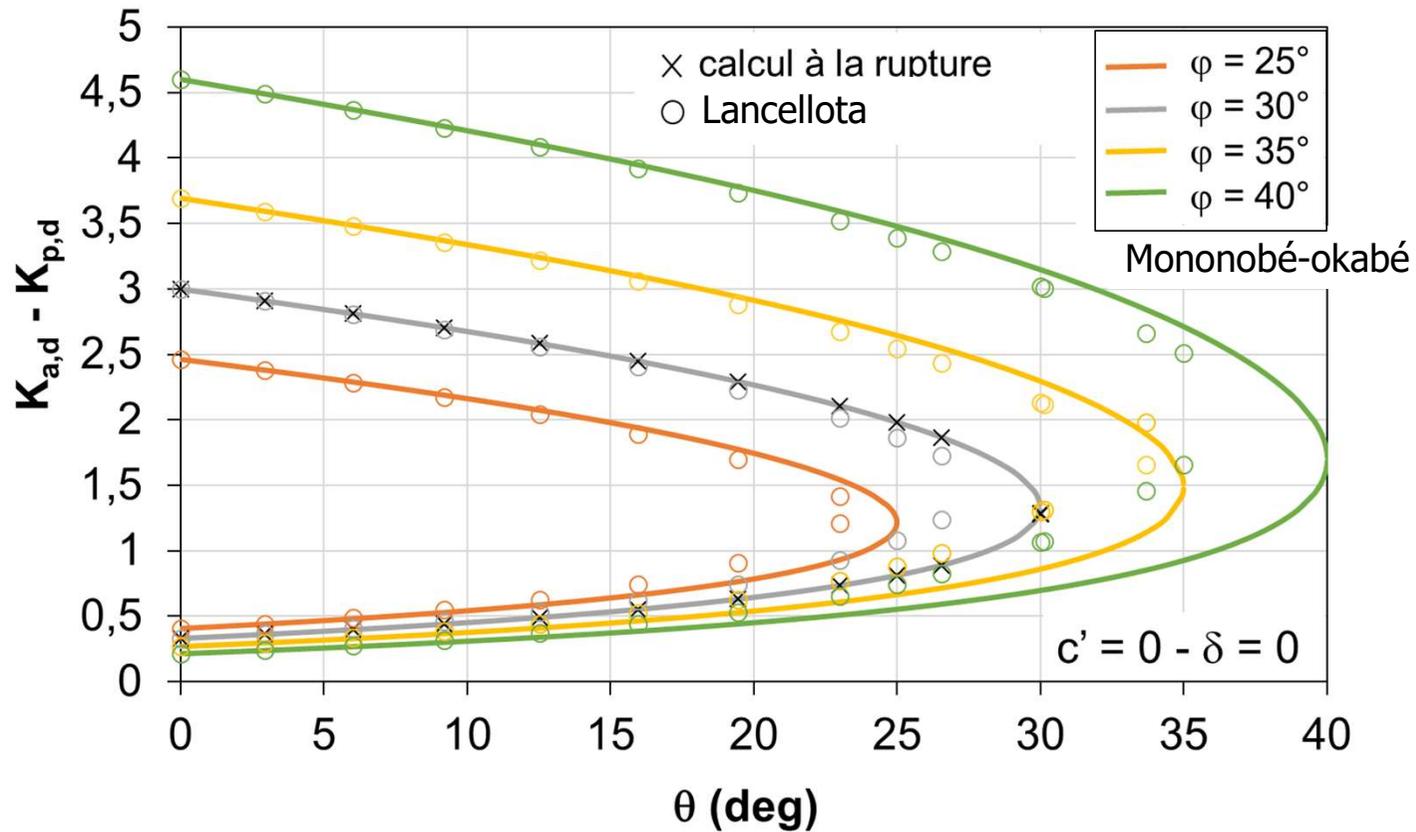
$$\text{avec } \psi_A = -0,5 \left(\arcsin \frac{\sin \theta_{eq}}{\sin \varphi} + \theta_{eq} \right)$$

$$K_{pd} = \left(\frac{1 + \sin \varphi}{\cos \theta_{eq} + \sqrt{(\sin \varphi)^2 - (\sin \theta_{eq})^2}} \right) \frac{e^{+2\psi_P \tan \varphi}}{\cos \theta_{eq}}$$

$$\text{avec } \psi_P = 0,5 \left(\arcsin \frac{\sin \theta_{eq}}{\sin \varphi} + \theta_{eq} \right)$$

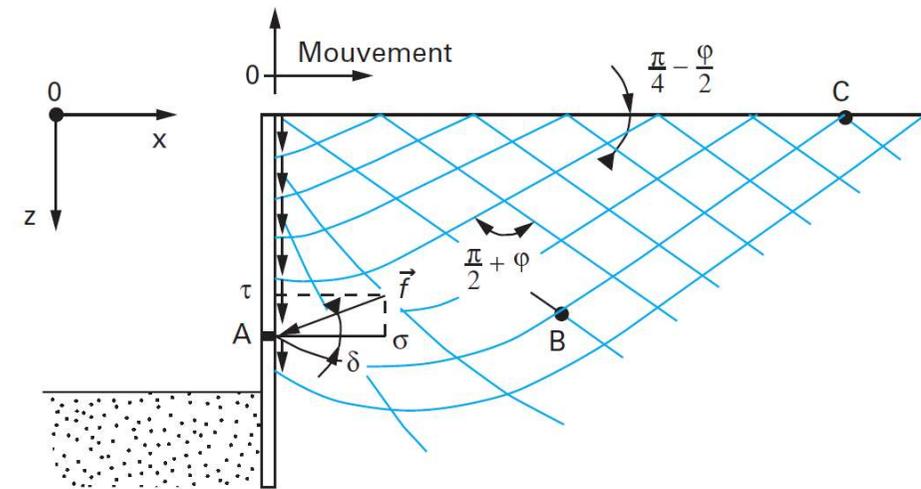
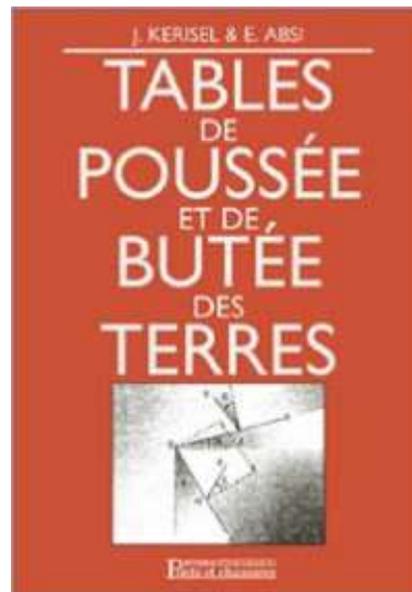
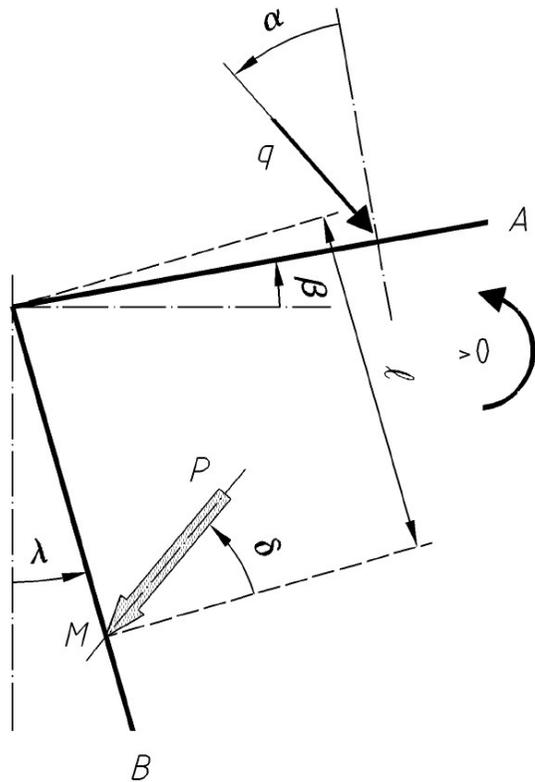
Modèle de Lancellota

- Comparaison aux approches globales de type Mononobé-Okabé ou Calcul à la rupture



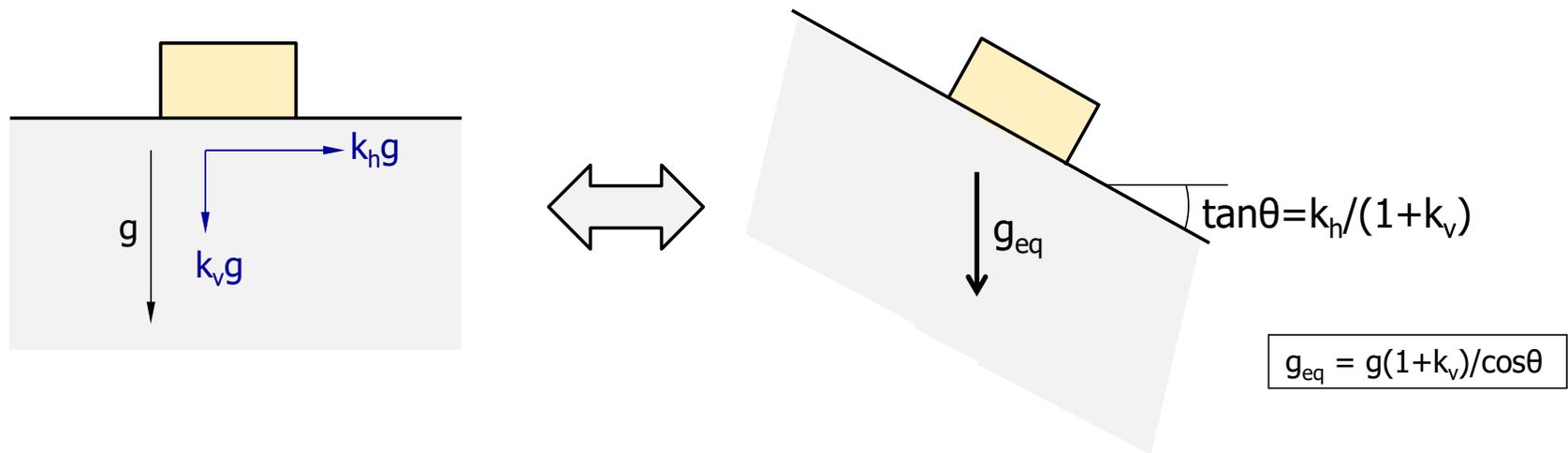
Adaptation des tables de Caquot-Kérisel

- Capitaliser sur les acquis de l'ingénierie géotechnique en matière de calcul de soutènements...



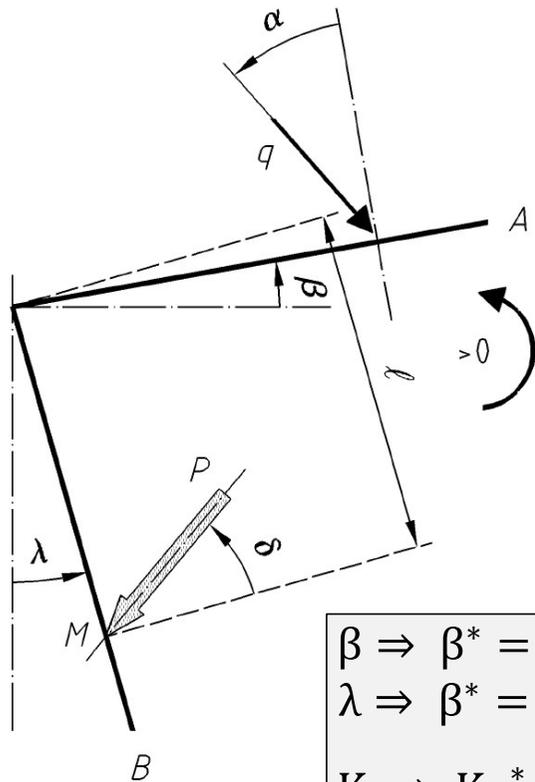
Adaptation des tables de Caquot-Kérisel

- Rappel du principe de l'approche pseudo-statique = modification de la gravité



Adaptation des tables de Caquot-Kérisel

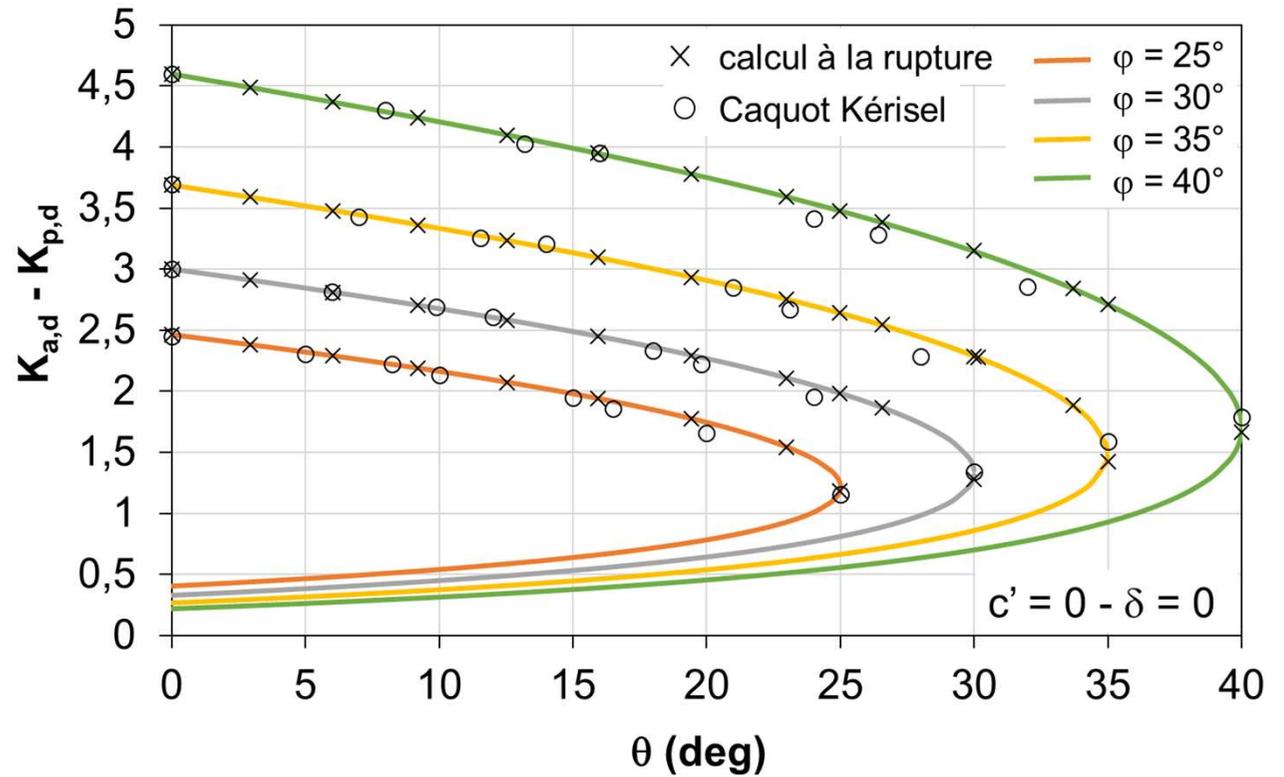
- Obtention des coefficients de poussée et (surtout) de butée avec rotation θ du modèle



$$\beta \Rightarrow \beta^* = \beta \pm \theta$$

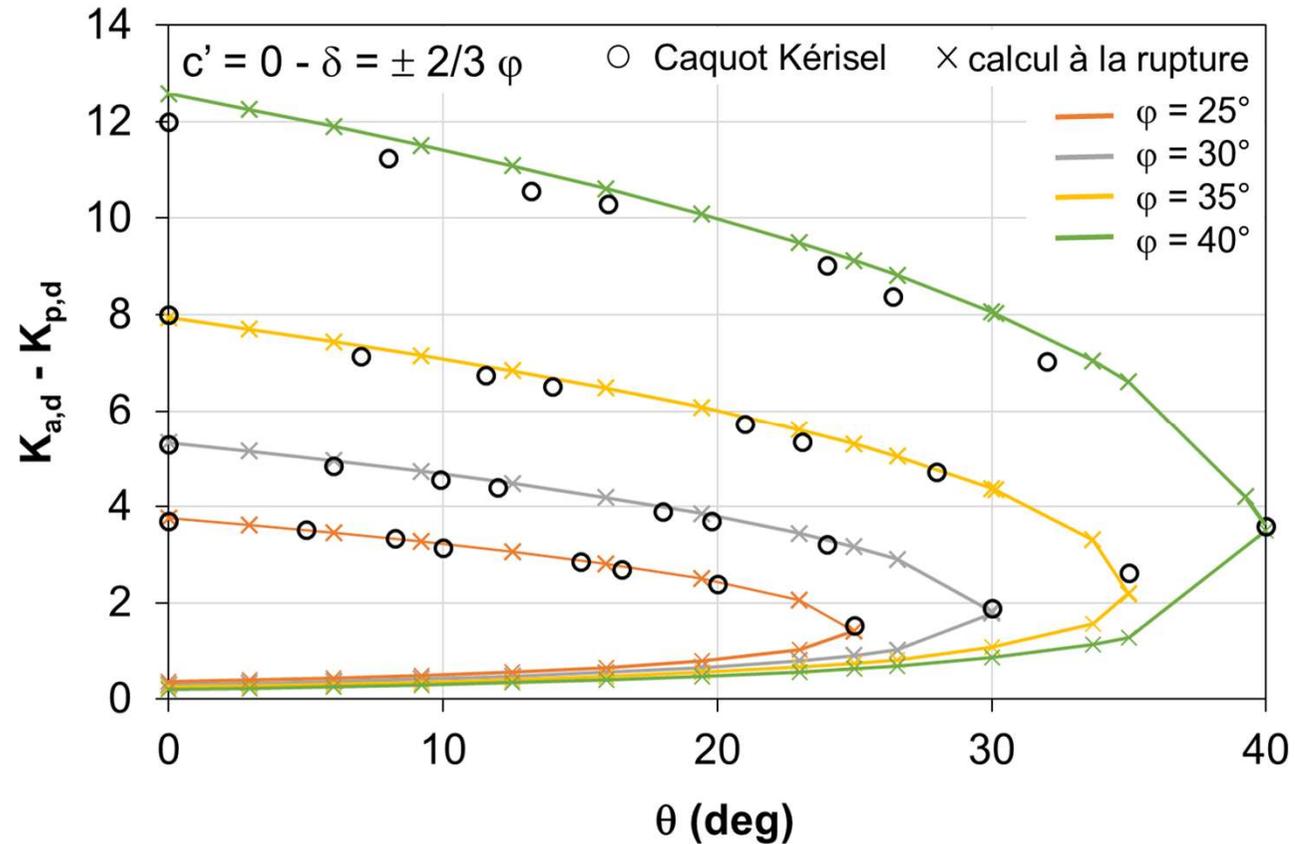
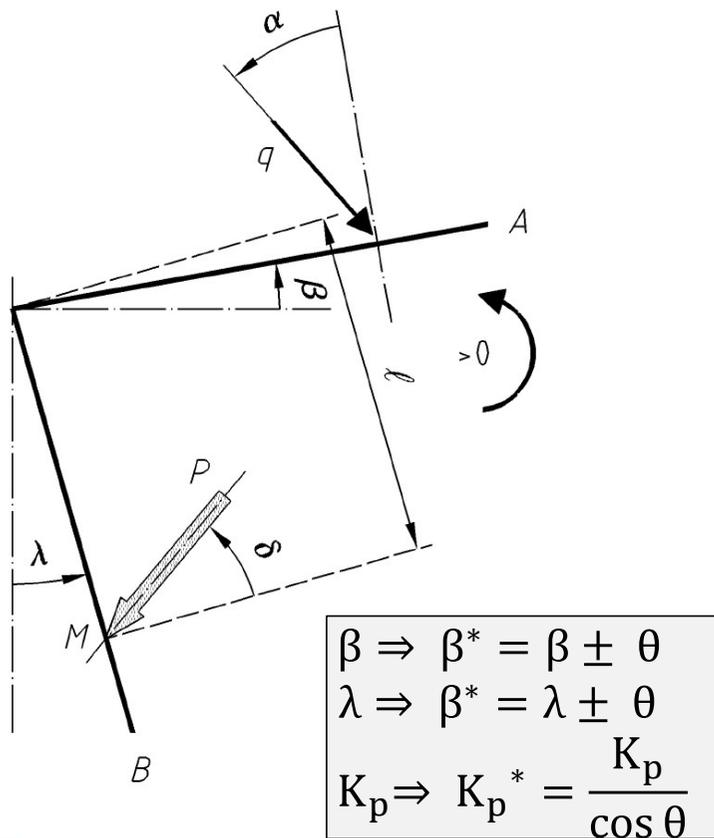
$$\lambda \Rightarrow \beta^* = \lambda \pm \theta$$

$$K_p \Rightarrow K_p^* = \frac{K_p}{\cos \theta}$$



Adaptation des tables de Caquot-Kérisel

- Obtention des coefficients de poussée et (surtout) de butée avec rotation θ du modèle



Synthèse

- Approches globales
 - ⇒ Modèle de Mononobé-Okabé pour estimer les incréments poussée/butée dans les cas courants
 - ⇒ Calcul à la rupture pour des stratigraphies complexes et une gestion plus fine de la rugosité et de la cohésion (notamment pour la butée)
- Approches locales
 - ⇒ Modèle de Lancellota = approche en contraintes effectives présentant un intérêt pratique
 - ⇒ Utilisation des abaques de Caquot Kérisel avec gravité modifiée, approche qui s'inscrit dans la continuité de la pratique des calculs de soutènement sous action statique.

Sommaire

Partie I – 12 Avril 2022 de 10h30 à 12h30

- Stratégie de dimensionnement sous séisme
- Evaluation des poussées et butées dynamiques
- REX post-séisme en milieux urbain et maritime