

Chapitre Quatre

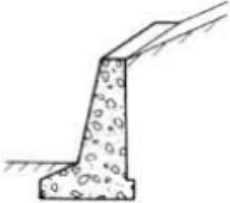
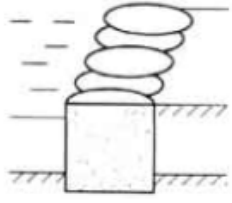
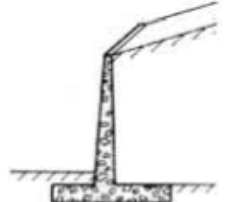
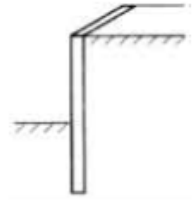
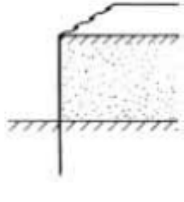
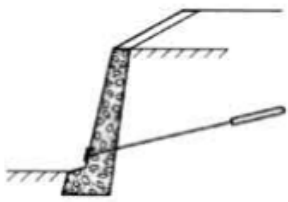
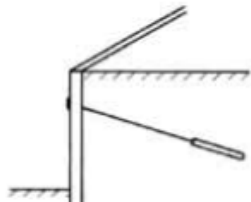
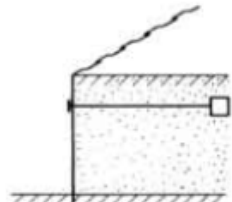
Stabilité sismique des ouvrages de soutènement

- ❑ **Introduction**
- ❑ **Stabilité sous conditions statiques**
 - ❖ *Poussées et butées des terres*
 - ❖ *Coefficient des terres au repos*
 - ❖ *Coefficients de poussée et de butée*
 - ❖ *Résultantes de poussée et de butée*
 - ❖ *Ligne de rupture*
 - ❖ *Rugosité sol-écran*
- ❑ **Stabilité sous conditions sismiques**
 - ❖ *Méthode dynamique directe*
 - ❖ *Méthode statique équivalente*
- ❑ **Exercices**



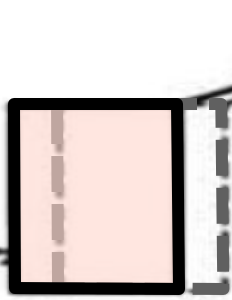
INTRODUCTION

□ Classification des ouvrages de soutènement

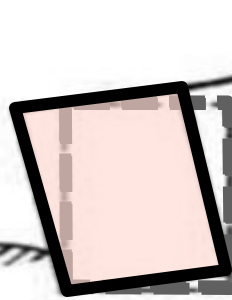
Mode de reprise de la poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids de l'ouvrage	 Mur poids en béton ou maçonnerie	 Mur en Terre Armée	 Ouvrage cellulaire
Encastrement	 Mur cantilever en béton armé	 Paroi moulée	 Rideau de palplanches
Ancrage	 Mur en béton, ancré	 Paroi moulée ancrée	 Rideau ancré

(François Schlosser, Techniques de l'Ingénieur, C244-1)

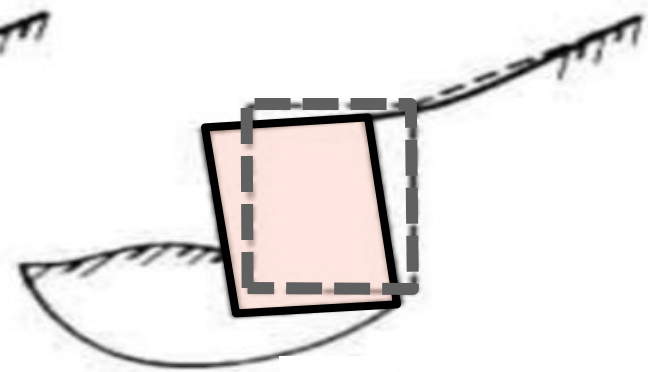
□ Modes de rupture des ouvrages de soutènement



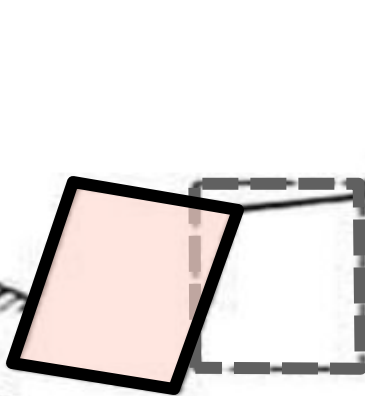
**Glissement de l'ouvrage
sur sa base**



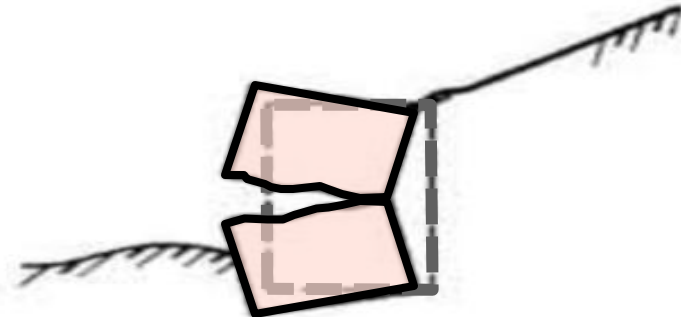
Renversement de l'ouvrage



**Poinçonnement du sol
de fondation**



**Grand glissement
englobant l'ouvrage**



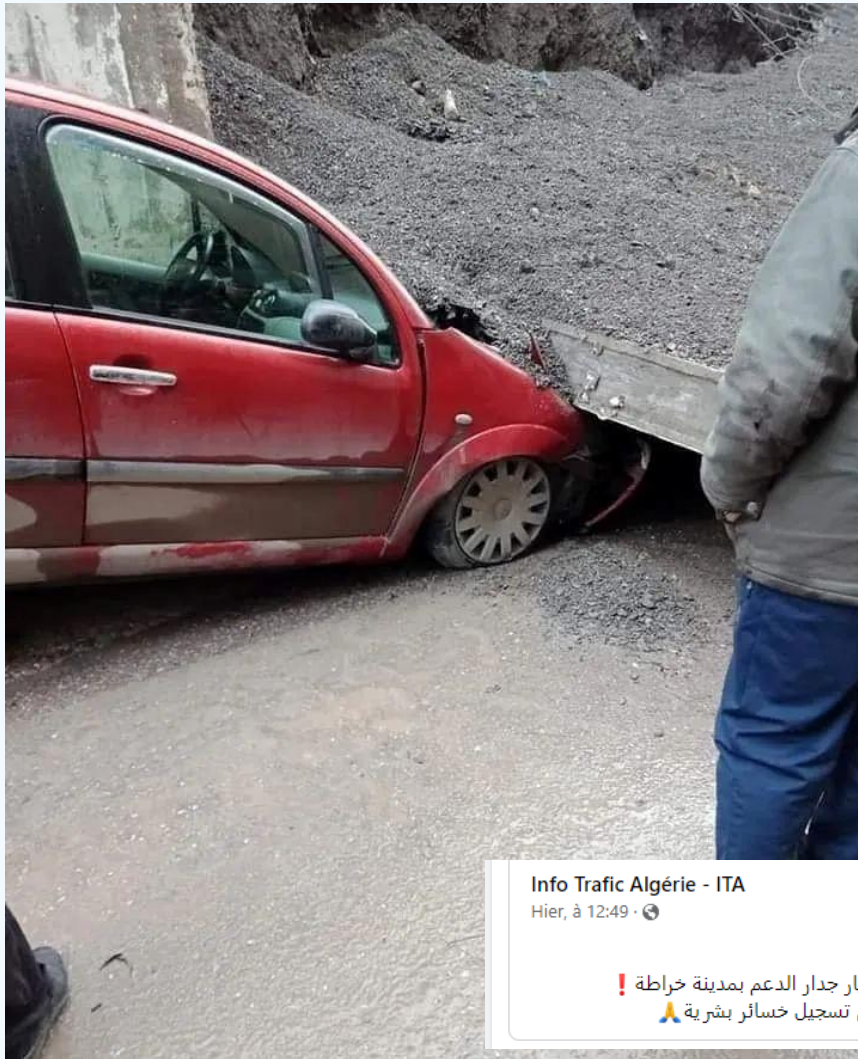
**Rupture des éléments structuraux
de l'ouvrage**

(François Schlosser, Techniques de l'Ingénieur, C244-1)

❑ Exemples de ruptures typiques des ouvrages de soutènement



❑ Exemples de ruptures typiques des ouvrages de soutènement



Info Trafic Algérie - ITA

Hier, à 12:49 · 🌐

#حادث_مرور #iAccident

● كادت ان تكون الكارثة بسطيف 🚚 بعد إنهيار جدار الدعم بمدينة خراطة !
● الحادثة تسببت في خسائر مادية لسيارتين دون تسجيل خسائر بشرية 🙏

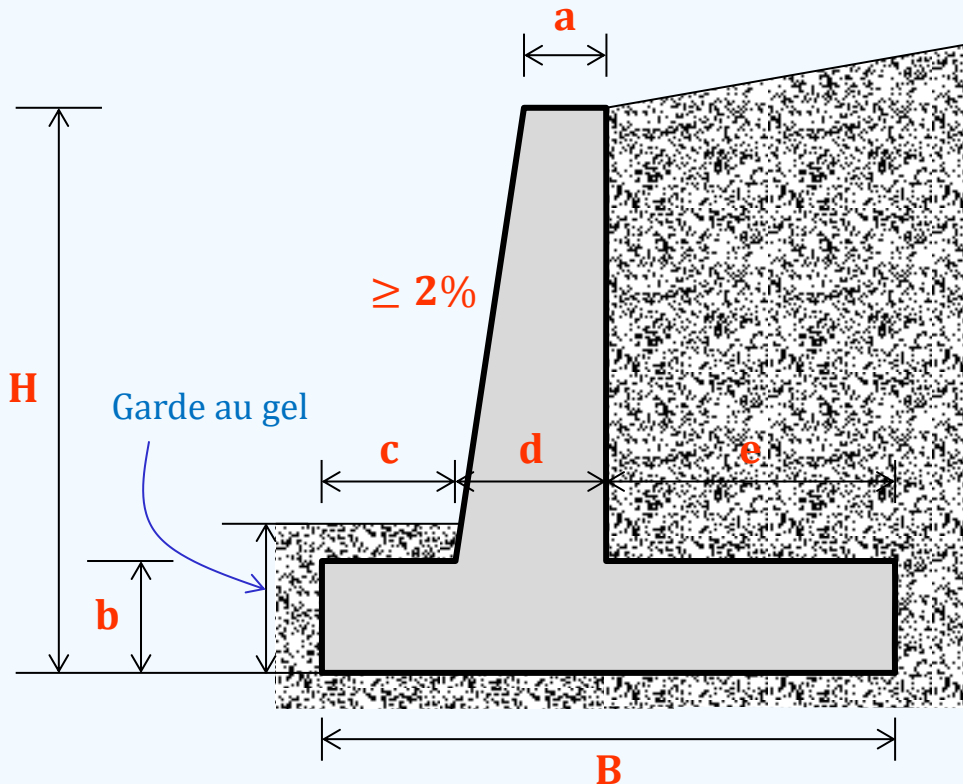
❑ Exemples de ruptures typiques des ouvrages de soutènement



Une voiture écrasée par l'effondrement d'un mur de soutènement © Radio France - Marie-Ange Lescure



□ Formules de prédimensionnement des ouvrages de soutènement



Méthode courante :

$$B = 0.20 + 0.45H$$

$$a = \min(H/24, 16 \text{ cm})$$

$$b = H/12$$

$$c = H/8 \text{ à } H/5$$

$$d = H/12$$

$$e = B - c - d$$

Méthode SETRA (MUR 73) :

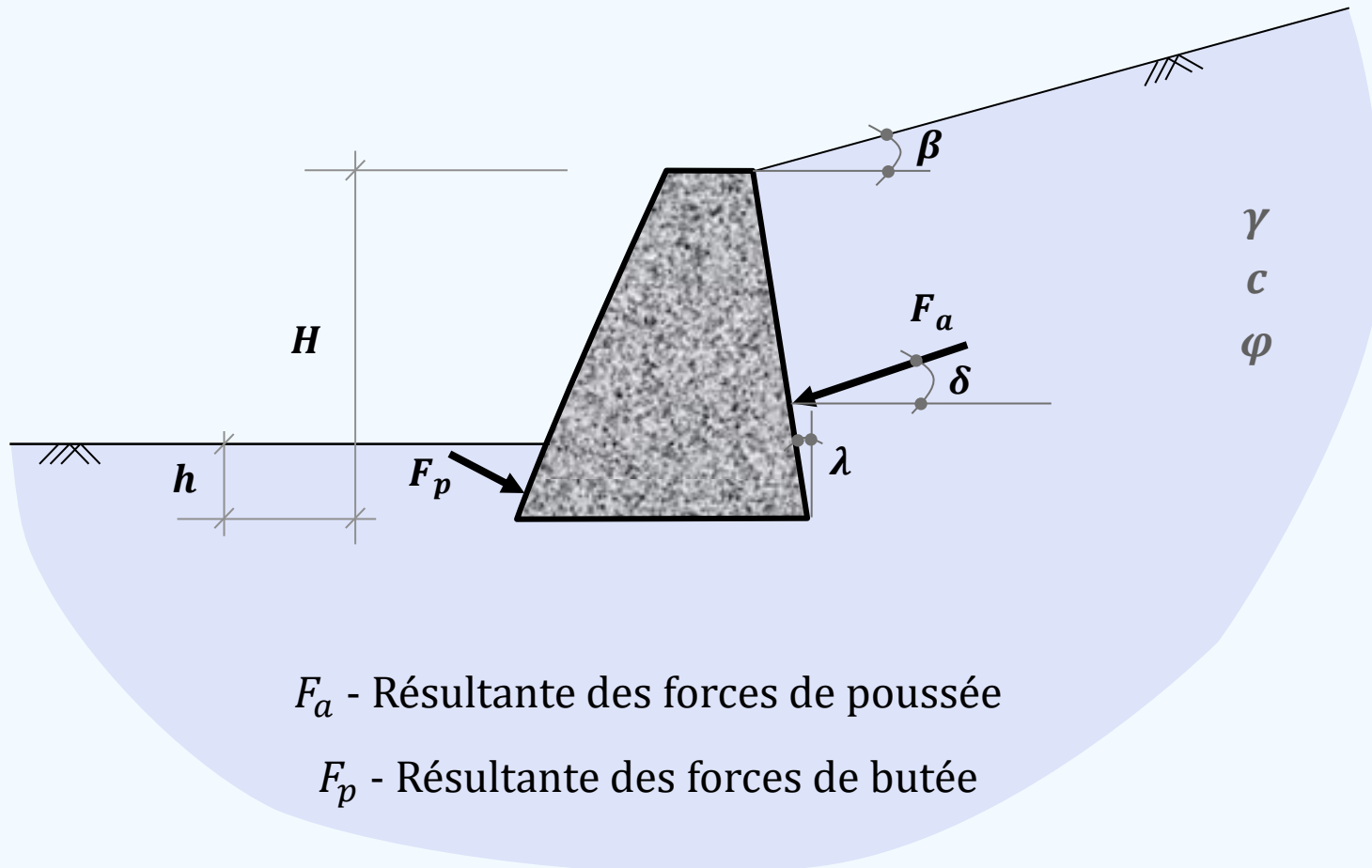
Abaques

Cas des murs cantilever en béton armé

STABILITÉ SOUS CONDITIONS STATIQUES

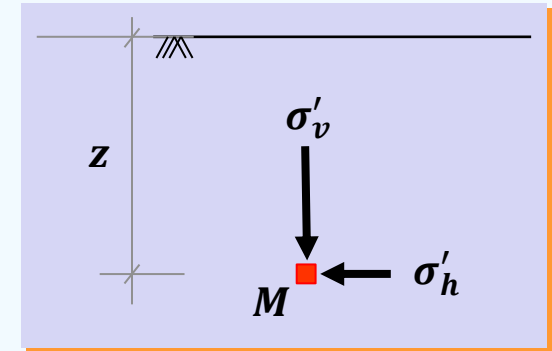
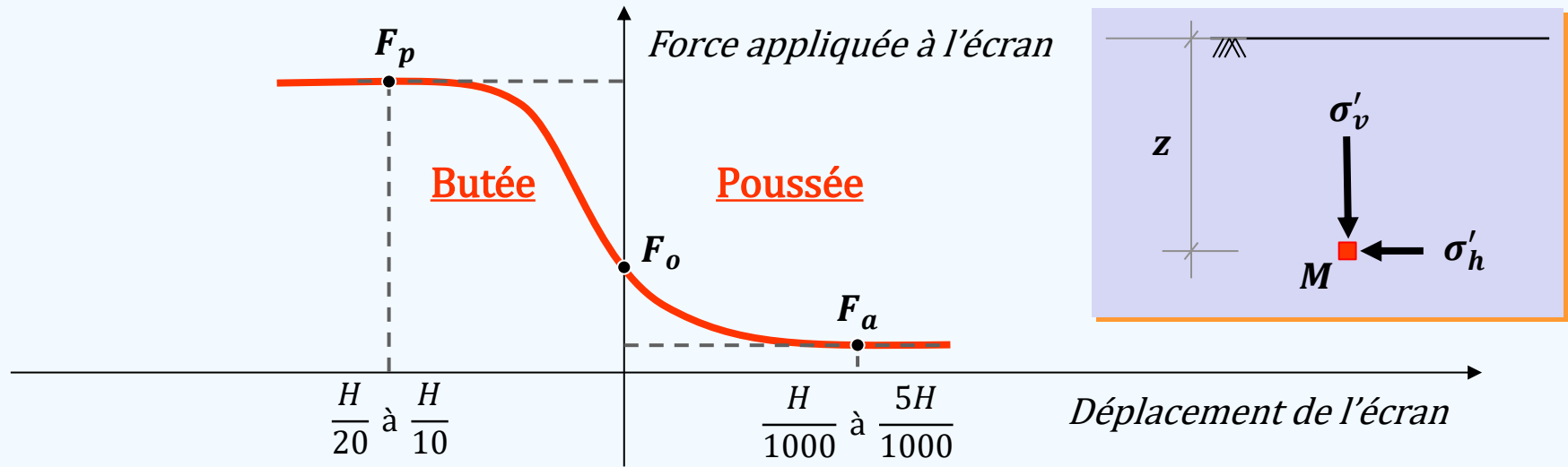
□ Stabilité sous conditions statiques

- **Poussées et butées des terres**



□ Stabilité sous conditions statiques

- Poussées et butées des terres**



$$\sigma'_p = K_p \sigma'_v \quad \sigma'_h = K_o \sigma'_v \quad \sigma'_a = K_a \sigma'_v$$

K_p - Coeff. de butée

K_o - Coeff. des terres au repos

K_a - Coeff. de poussée

$$K_a < K_o < K_p$$

□ Stabilité sous conditions statiques

- **Coefficient des terres au repos**

$$\sigma'_h = K_o \sigma'_v$$

tel que : **$K_o \approx 1 - \sin(\varphi')$** (Jaky, 1944)

Attention :

A ne pas confondre avec :

$$\sigma_h = K \sigma_v$$

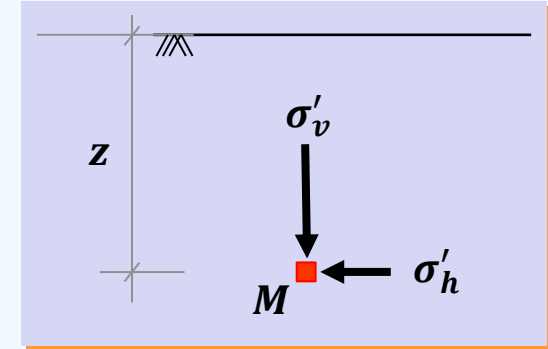
tel que :

$$K = \frac{\nu}{1-\nu} \quad \Leftrightarrow \quad \varepsilon_h = \frac{1}{E} [\sigma_h - \nu(\sigma_h + \sigma_v)] = 0$$

où ν désigne le coefficient de Poisson du sol.

Valeurs indicatives de K_o :

- *Sable compacté : $K_o = 0.40$ à 0.45*
- *Sable lâche : $K_o = 0.45$ à 0.50*
- *Argile normalement consolidée : $K_o = 0.50$*
- *Argile surconsolidée : $K_o = 1$*
- *Roche : $K_o \geq 1$*



□ Stabilité sous conditions statiques

• Coefficients de poussée et de butée

✓ *Théorie de Coulomb (1776)*

(Ecran vertical : $\lambda = 0$; Terrain naturel plat : $\beta = 0$;

Ecran lisse : $\delta = 0$)

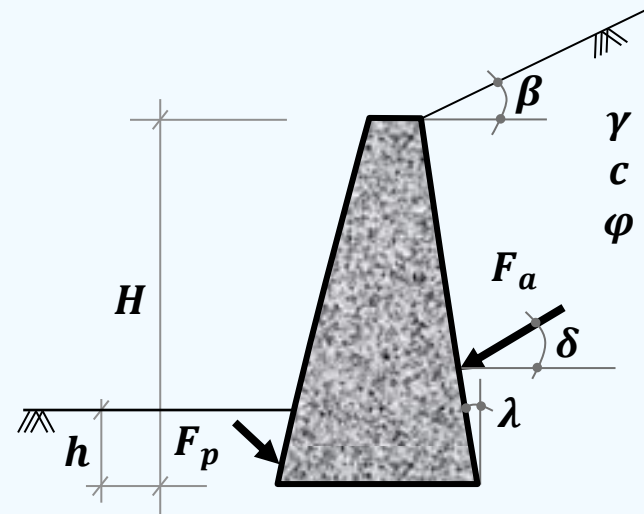
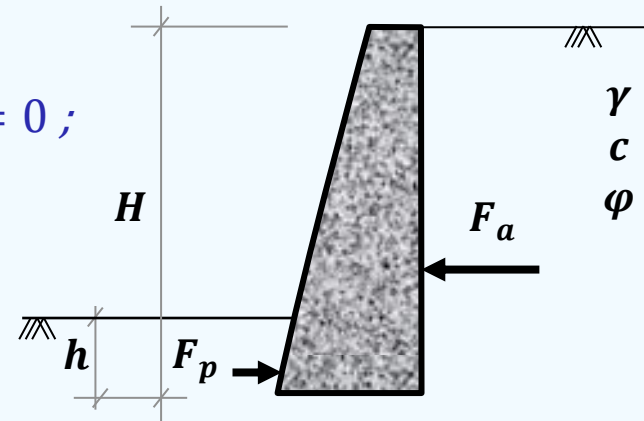
➤ Coefficient de poussée : $K_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$

➤ Coefficient de butée : $K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$

✓ *Généralisation de Poncelet (1830)*

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \lambda)}{\cos^2(\lambda) \cos(\delta + \lambda) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\delta + \lambda) \cos(\lambda - \beta)}} \right]^2}$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\varphi + \lambda)}{\cos^2(\lambda) \cos(\delta - \lambda) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi + \beta)}{\cos(\delta - \lambda) \cos(\lambda - \beta)}} \right]^2}$$

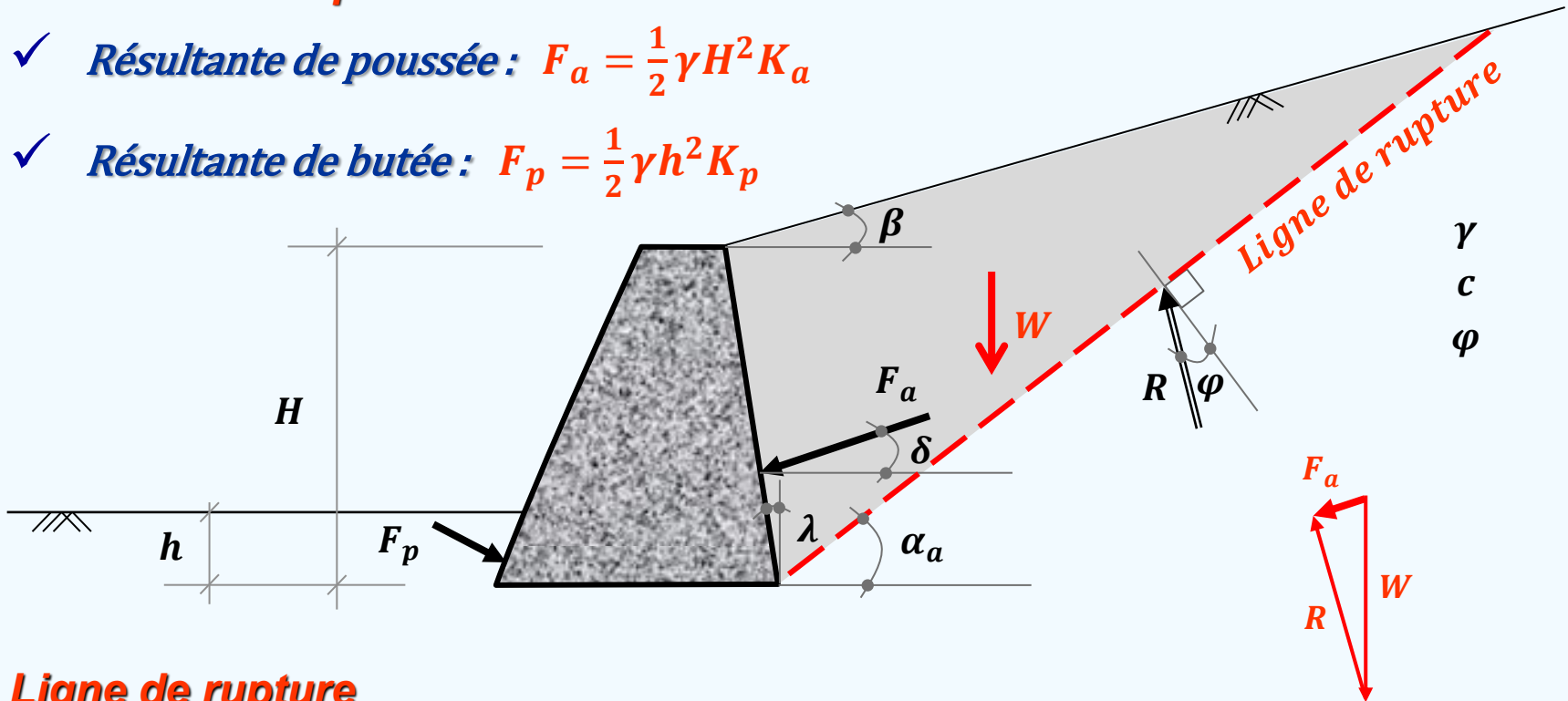


□ Stabilité sous conditions statiques

- **Résultantes de poussée et de butée**

- ✓ **Résultante de poussée :** $F_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a$

- ✓ **Résultante de butée :** $F_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 K_p$



- **Ligne de rupture**

$$\alpha_a = \varphi + \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{[1 + \tan^2(\varphi)][1 + \tan(\delta)\cot(\varphi)] - \tan(\varphi)}}{1 + \tan(\delta)[\tan(\varphi) + \cot(\varphi)]} \right\}$$

Diagramme d'équilibre
(Hodographe)

□ Stabilité sous conditions statiques

- **Rugosité de l'interface sol-écran**

Elle est définie par l'angle δ que fait la force de poussée ou la force de butée avec le parement. Le tableau ci-après en donne les valeurs indicatives.

Parement	δ/φ					
	$\varphi < 30^\circ$		$30^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ$		$\varphi > 35^\circ$	
	poussée	butée	poussée	butée	poussée	butée
Lisse	0	-1/3	0	-2/3	+1/3	-2/3
Rugueux	0	-1/3	+1/3	-2/3	+2/3	-2/3
Très rugueux	+1/3	-1/3	+2/3	-2/3	+2/3	-2/3



Nota : $\delta = 0 \Rightarrow$ Le mur de soutènement retient soit un remblai soit un déblai équipé de tapis synthétique drainant.

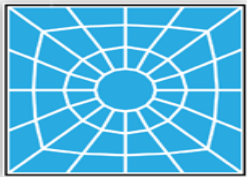
STABILITÉ SOUS CONDITIONS SISMIQUES

□ Stabilité sous conditions sismiques

- **Méthode dynamique directe**

Elle est basée sur la résolution directe de l'équation d'équilibre dynamique à l'aide d'outils numériques utilisant la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies, la méthode des équations intégrales, ...

Parmi les outils numériques utilisés en géotechnique, on peut citer les logiciels suivants : FLAC, PLAXIS, OPTUM, ...



ITASCA
Flac
www.p30download.com



PLAXIS® 2D
CONNECT Edition

Op+um^{CE}

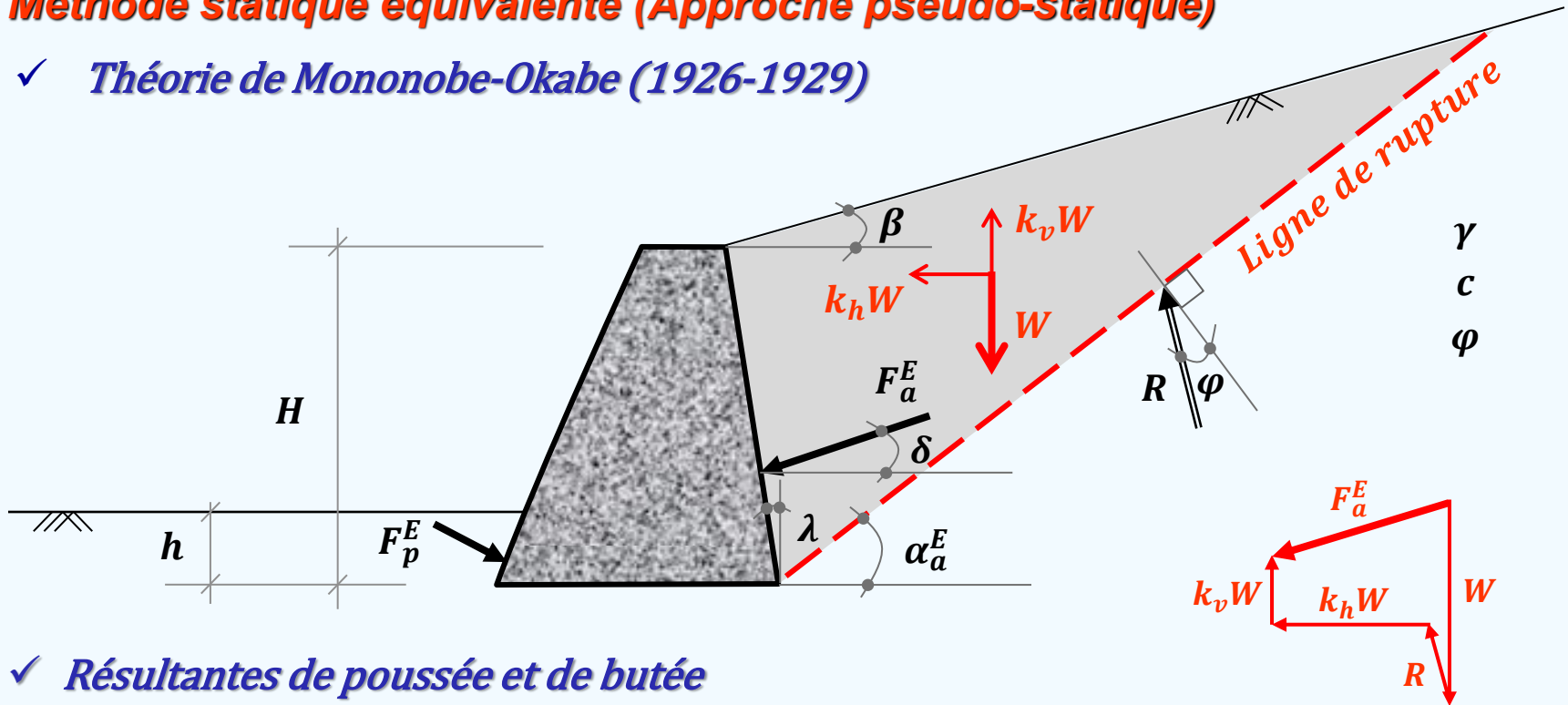
Détails : Voir cours de MEF et de MDF

Chap. 4 : Stabilité sismique des ouvrages de soutènement

❑ Stabilité sous conditions sismiques

- **Méthode statique équivalente (Approche pseudo-statique)**

✓ *Théorie de Mononobe-Okabe (1926-1929)*



✓ Résultantes de poussée et de butée

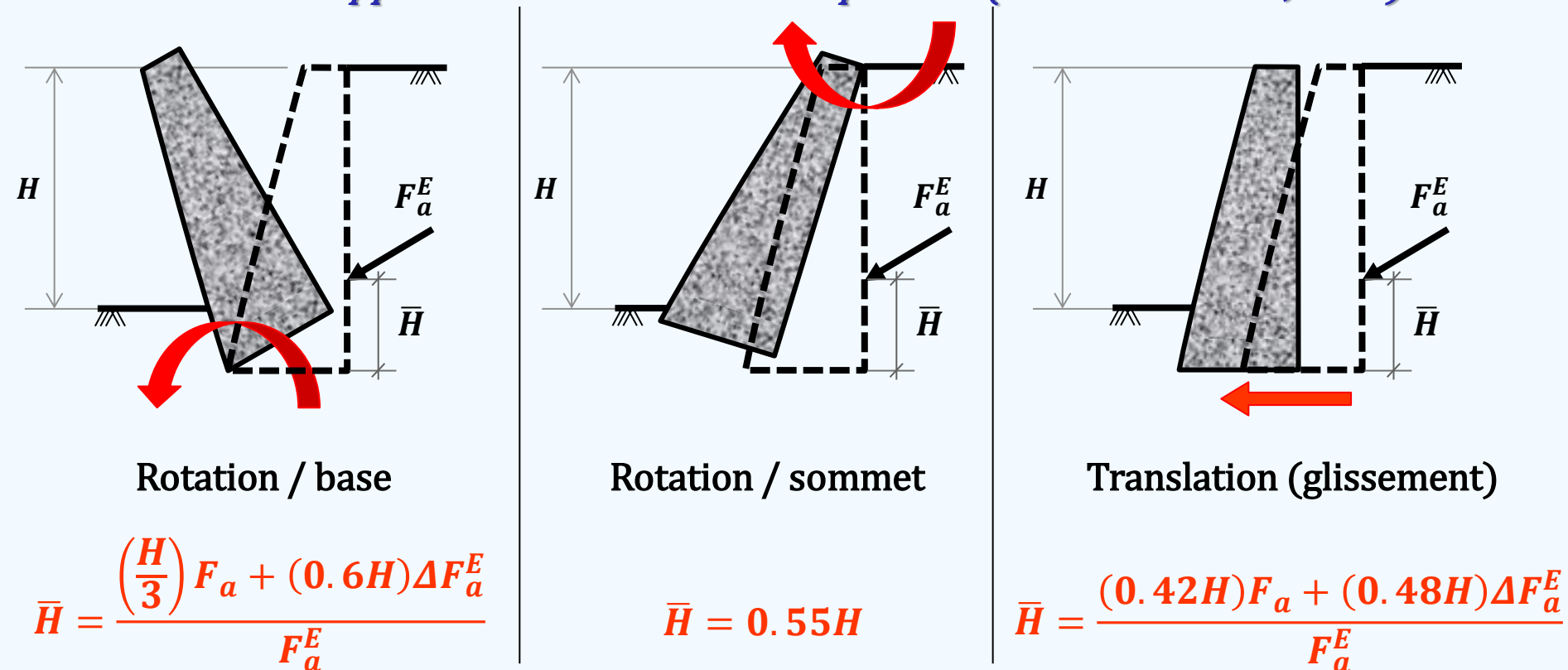
- Résultante de poussée : $F_a^E = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_a^E$
- Résultante de butée : $F_p^E = \frac{1}{2} \gamma h^2 (1 - k_v) K_p^E$

Diagramme d'équilibre (Hodographe)

□ Stabilité sous conditions sismiques

- **Méthode statique équivalente (Approche pseudo-statique)**

✓ *Point d'application de la résultante de poussée (Seed et Whitman, 1970)*



$\Delta F_a^E = F_a^E - F_a$ | F_a : résultante de poussée sous conditions statiques

□ Stabilité sous conditions sismiques

- **Méthode statique équivalente (Approche pseudo-statique)**

✓ **Annexe :** Valeurs des coefficients K_a^E et K_p^E pour un écran vertical

tan(θ)=0 ($\theta=0$)						
φ (°)	δ/φ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	0,840	1,191	0,820	1,227	0,803	1,262
10	0,704	1,420	0,674	1,519	0,652	1,621
15	0,589	1,698	0,556	1,901	0,533	2,131
20	0,490	2,040	0,458	2,414	0,438	2,888
25	0,406	2,464	0,377	3,124	0,361	4,079
30	0,333	3,000	0,308	4,143	0,297	6,105
35	0,271	3,690	0,251	5,680	0,244	9,962
40	0,217	4,599	0,202	8,147	0,200	18,717
45	0,172	5,828	0,160	12,466	0,162	46,087

tan(θ)=0.1 ($\theta=5.71^\circ$)						
φ (°)	δ/φ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	0,809	1,280	0,789	1,344	0,776	1,410
15	0,678	1,556	0,651	1,711	0,634	1,888
20	0,569	1,888	0,541	2,197	0,525	2,587
25	0,476	2,300	0,450	2,866	0,438	3,684
30	0,397	2,821	0,373	3,829	0,366	5,550
35	0,328	3,493	0,309	5,283	0,306	9,107
40	0,268	4,380	0,254	7,621	0,256	17,193
45	0,217	5,583	0,206	11,723	0,212	42,504

□ Stabilité sous conditions sismiques

- **Méthode statique équivalente (Approche pseudo-statique)**

✓ **Annexe :** Valeurs des coefficients K_a^E et K_p^E pour un écran vertical

tan(θ)=0.2 (θ =11.31°)						
ϕ (°)	δ/ϕ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	0,811	1,369	0,798	1,470	0,795	1,586
20	0,672	1,712	0,653	1,950	0,647	2,252
25	0,564	2,119	0,543	2,589	0,539	3,264
30	0,473	2,629	0,454	3,500	0,454	4,975
35	0,396	3,285	0,380	4,873	0,384	8,235
40	0,328	4,152	0,317	7,084	0,326	15,653
45	0,270	5,330	0,263	10,970	0,276	38,908

tan(θ)=0.3 (θ =16.70°)						
ϕ (°)	δ/ϕ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	0,831	1,481	0,831	1,637	0,847	1,837
25	0,680	1,910	0,672	2,276	0,683	2,801
30	0,569	2,418	0,559	3,146	0,572	4,371
35	0,478	3,063	0,469	4,445	0,486	7,340
40	0,400	3,912	0,395	6,533	0,416	14,095
45	0,334	5,066	0,331	10,204	0,357	35,295

□ Stabilité sous conditions sismiques

- **Méthode statique équivalente (Approche pseudo-statique)**

✓ **Annexe :** Valeurs des coefficients K_a^E et K_p^E pour un écran vertical

tan(θ)=0.4 (θ =21.80°)						
ϕ (°)	δ/ϕ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	0,860	1,636	0,879	1,884	0,925	2,241
30	0,697	2,175	0,704	2,753	0,740	3,716
35	0,581	2,820	0,585	3,990	0,622	6,410
40	0,488	3,657	0,493	5,961	0,533	12,508
45	0,409	4,791	0,416	9,423	0,462	31,658

tan(θ)=0.5 (θ =26.57°)						
ϕ (°)	δ/ϕ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
30	0,890	1,866	0,933	2,274	1,023	2,946
35	0,716	2,545	0,744	3,493	0,819	5,420
40	0,596	3,381	0,619	5,361	0,693	10,880
45	0,500	4,500	0,522	8,620	0,600	27,988

□ Stabilité sous conditions sismiques

- **Méthode statique équivalente (Approche pseudo-statique)**

✓ **Annexe :** Valeurs des coefficients K_a^E et K_p^E pour un écran vertical

tan(θ)=0.6 (θ =30.96°)						
φ (°)	δ/φ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
35	0,914	2,207	0,987	2,910	1,141	4,305
40	0,735	3,074	0,789	4,717	0,921	9,183
45	0,611	4,189	0,657	7,787	0,787	24,269

tan(θ)=0.7 (θ =34.99°)						
φ (°)	δ/φ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
35	1,461	1,520	1,736	1,823	2,256	2,396
40	0,929	2,713	1,038	3,993	1,282	7,353
45	0,751	3,849	0,836	6,911	1,054	20,471

□ Stabilité sous conditions sismiques

- **Méthode statique équivalente (Approche pseudo-statique)**

✓ **Annexe :** Valeurs des coefficients K_a^E et K_p^E pour un écran vertical

tan(θ)=0.8 (θ =38.66°)						
ϕ (°)	δ/ϕ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-
40	1,264	2,210	1,507	3,051	2,037	5,129
45	0,935	3,465	1,086	5,964	1,463	16,529

tan(θ)=0.9 (θ =41.99°)						
ϕ (°)	δ/ϕ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-
45	1,206	2,994	1,482	4,872	2,197	12,263

□ Stabilité sous conditions sismiques

- **Méthode statique équivalente (Approche pseudo-statique)**

✓ **Annexe :** Valeurs des coefficients K_a^E et K_p^E pour un écran vertical

$\tan(\theta)=1 \quad (\theta=45^\circ)$						
$\varphi \text{ (}^\circ\text{)}$	δ/φ					
	0		1/3		2/3	
	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}	K_{aE}	K_{pE}
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-
45	2,000	2,000	2,828	2,828	5,464	5,464

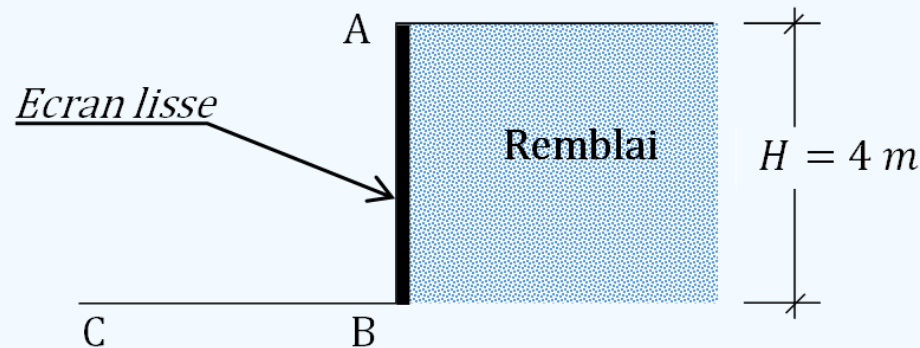
Parement	δ/φ					
	$\varphi < 30^\circ$		$30^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ$		$\varphi > 35^\circ$	
	poussée	butée	poussée	butée	poussée	butée
Lisse	0	-1/3	0	-2/3	+1/3	-2/3
Rugueux	0	-1/3	+1/3	-2/3	+2/3	-2/3
Très rugueux	+1/3	-1/3	+2/3	-2/3	+2/3	-2/3

Merci de votre attention

Fin du Quatrième Chapitre

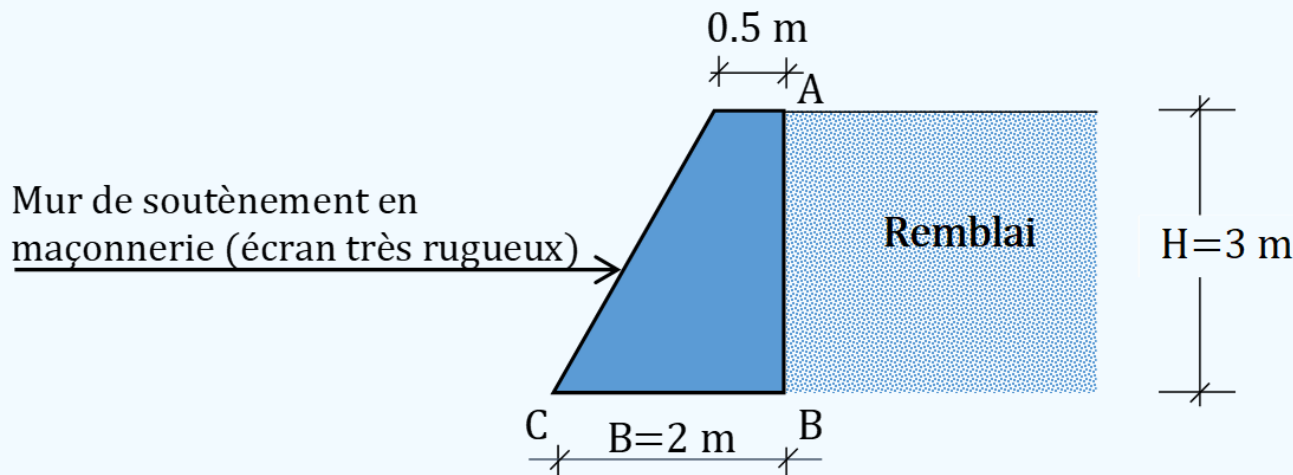
EXERCICES

Ex. 1 Tracer le diagramme de poussée des terres générées sous séisme d'accélération horizontale $a_h = 0.3g$ derrière un écran vertical lisse soutenant un remblai de $H = 4\text{ m}$ de hauteur constitué d'un tout-venant d'oued de poids volumique $\gamma = 21\text{ kN/m}^3$ et d'angle de frottement interne effectif $\varphi' = 35^\circ$ comme le montre la figure ci-après. Déterminer ensuite la résultante des poussées et son point d'application vis-à-vis du renversement par rapport aux points A et B et du glissement le long de BC.



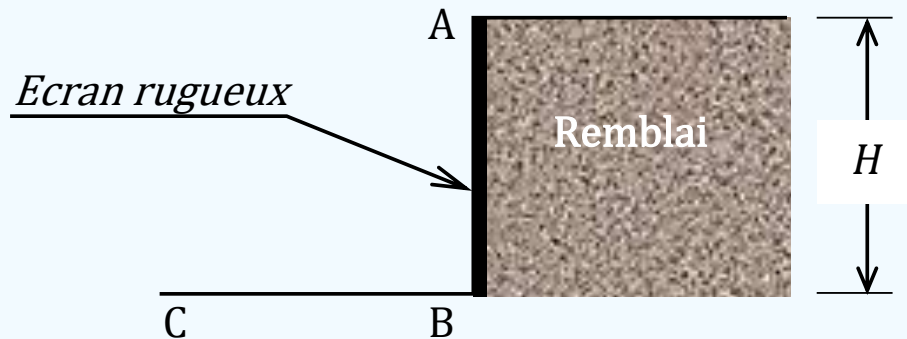
EXERCICES

Ex. 2 Tracer le diagramme de poussée des terres générées sous séisme d'accélération horizontale $a_h = 0.3g$ derrière un mur de soutènement en maçonnerie (écran très rugueux) de poids volumique $\gamma_{mur} = 22 \text{ kN/m}^3$ soutenant un remblai de hauteur $H = 3 \text{ m}$ constitué d'un tout-venant d'oued de poids volumique $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$ et d'angle de frottement interne effectif $\varphi' = 35^\circ$ comme l'indique la figure ci-après. Puis, déterminer la résultante des poussées et son point d'application vis-à-vis du renversement par rapport à la base. Vérifier ensuite la stabilité du mur vis-à-vis du renversement par rapport à sa base (on prendra comme coefficient de sécurité admissible au renversement $F_{adm} = 1.5$).



EXERCICES

Ex. 3 (Interro. du 12/12/2022) Tracer le diagramme de poussée des terres générées sous séisme d'accélération horizontale $a_h = 0.4g$ derrière un écran vertical rugueux soutenant un remblai de hauteur $H = 4\text{ m}$ constitué d'un tout-venant d'oued de poids volumique $\gamma = 20\text{ kN/m}^3$ et d'angle de frottement interne effectif $\varphi' = 40^\circ$ comme le montre la figure ci-après. Déterminer ensuite les résultantes de poussées statique et sismique et leur point d'application vis-à-vis du renversement par rapport aux points A et B et vis-à-vis du glissement le long de BC.



EXERCICES

Ex. 4 (EFS du 14/01/2023) Tracer le diagramme de poussée des terres générées sous séisme d'accélération horizontale $a_h = 0.3g$ derrière un écran vertical très rugueux soutenant un remblai de hauteur $H = 3\text{ m}$ constitué d'un tout-venant d'oued de poids volumique sec $\gamma = 15\text{ kN/m}^3$ et d'angle de frottement interne effectif $\varphi' = 30^\circ$ comme le montre la figure ci-après. Déterminer ensuite les résultantes de poussées statique et sismique et leur point d'application vis-à-vis du renversement par rapport aux points A et B et vis-à-vis du glissement le long de BC.

