



*École Nationale  
des Travaux Publics  
de l'État*



# Cours MdS 2

## Ouvrages de soutènement

**Fabrice ROJAT**

Laboratoire de Lyon

Tél. 04 72 14 32 15

Mél. [fabrice.rojat@developpement-durable.gouv.fr](mailto:fabrice.rojat@developpement-durable.gouv.fr)

Ressources, territoires, habitats et logement  
Énergie et climat  
Prévention des risques  
Développement durable  
Infrastructures, transports et mer

**Présent  
pour  
l'avenir**

Ministère de l'Écologie, du Développement durable,  
des Transports et du Logement

[www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)

# Plan du cours

---

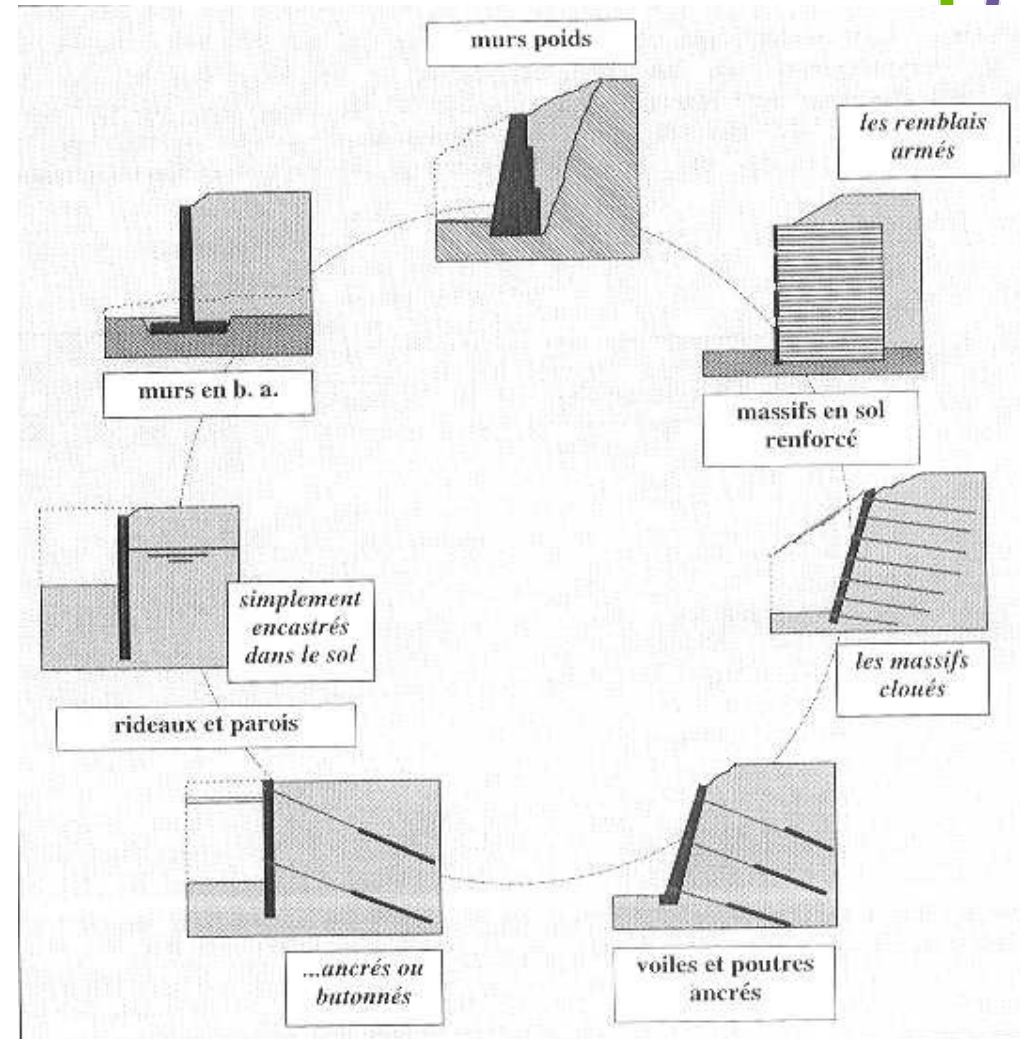
- I- Généralités sur les ouvrages de soutènement
- II- Notions de poussée et butée
- III- Calcul des murs poids
- IV- Calcul des rideaux de palplanches
- V- Notions sur les massifs en sol renforcé
- VI- Notions de pathologie des ouvrages



# Qu'est-ce-qu'un ouvrage de soutènement ?

## ■ Définition Eurocode 7 :

Les ouvrages de soutènements sont ceux qui retiennent des terrains (sols, roches ou remblais) et de l'eau. Le matériau est retenu par l'ouvrage s'il est maintenu à une pente plus raide que celle qu'il adopterait éventuellement si aucun ouvrage n'était présent. Les ouvrages de soutènement comprennent tous les types de murs et de systèmes d'appui dans lesquels des éléments de structure subissent des forces imposées par le matériau soutenu.



Source : SETRA - IQOA



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

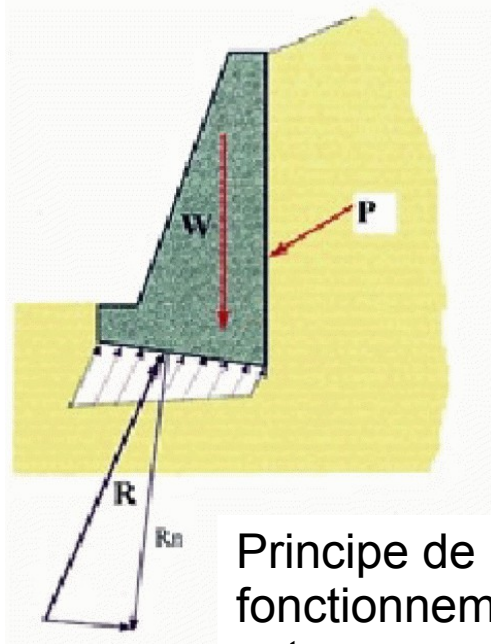
Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable,  
des Transports  
et du Logement

# Différentes techniques de soutènement

## Exemple 1 : murs en maçonnerie

### ■ Les murs poids

*Le poids propre du mur joue un rôle important dans le soutènement du matériau retenu*



Principe de fonctionnement externe



Pierres sèches



Maçonnerie jointoyée

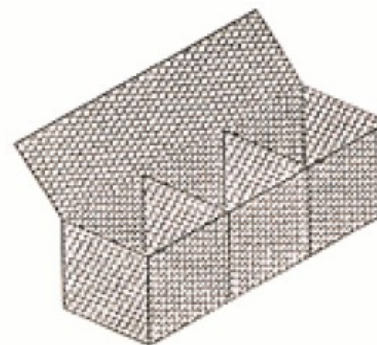
Source images : SETRA - IQOA

# Différentes techniques de soutènement

*Exemple 2 : mur en béton*



Source : SETRA - IQOA



*Exemple 3 : mur en gabions  
(plus souple)*



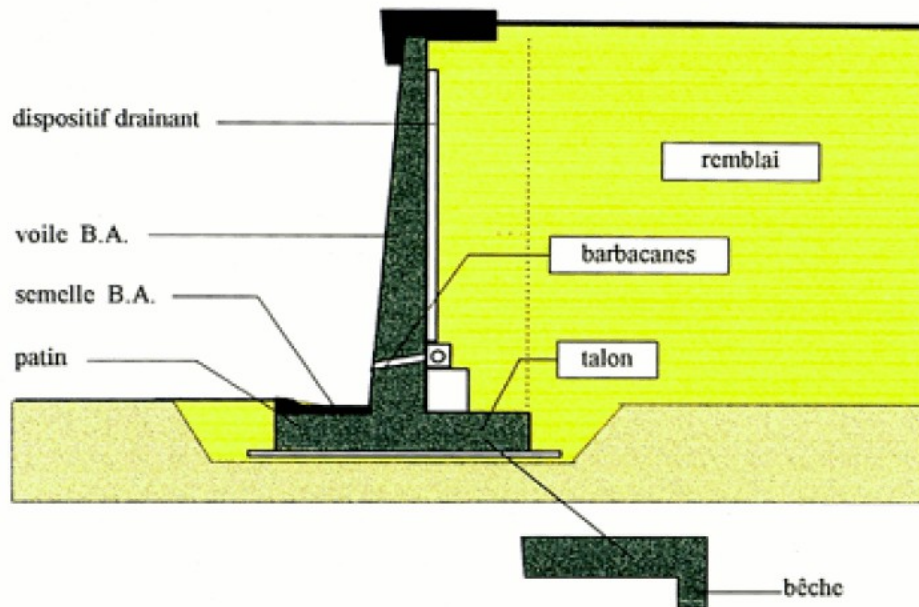
Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable,  
des Transports  
et du Logement

# Différentes techniques de soutènement

- **Les murs en béton armé « cantilever »**

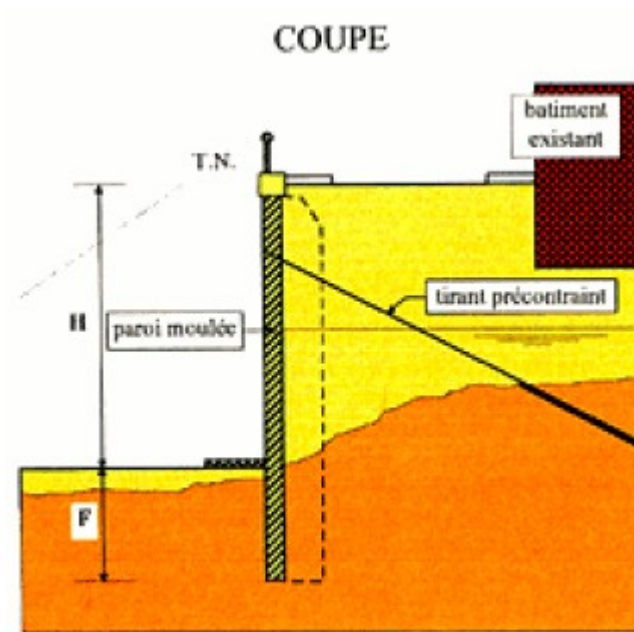
*Voile résistant en béton armé encastré dans une semelle de fondation (préfabriqué ou non)*



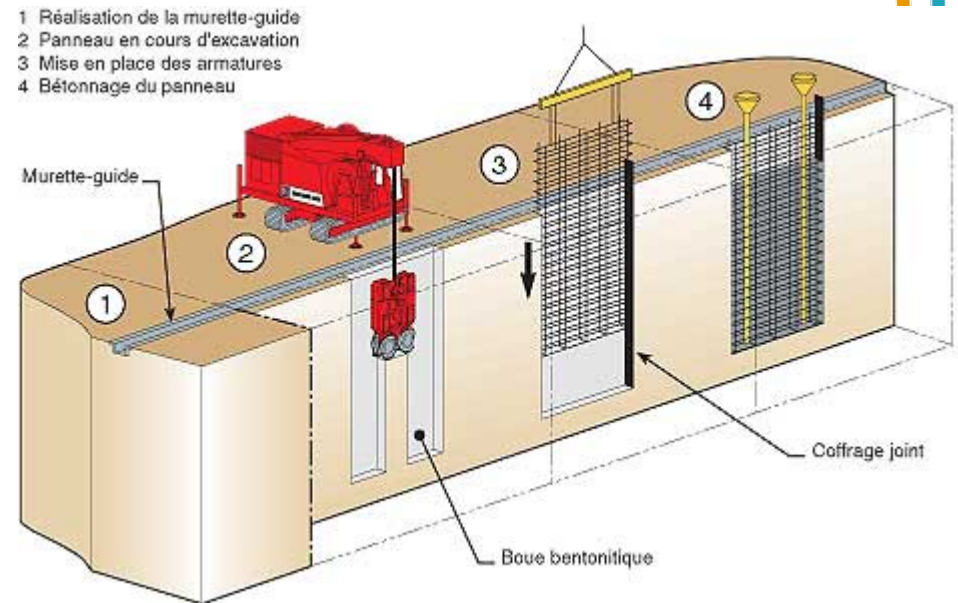
# Différentes techniques de soutènement

## ■ Les parois fabriquées dans le sol

*Juxtaposition d'éléments verticaux dont la tenue est assurée par leur fiche et des butons et tirants éventuels*



Source : SETRA - IQOA



Source : [www.estigc.fr](http://www.estigc.fr)

*Plusieurs techniques existent*

→

*Exemple des parois moulées*

# Différentes techniques de soutènement



Excavation avec une benne preneuse



Mise en place de la cage d'armature



Exemple de paroi achevée, avec tirants



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

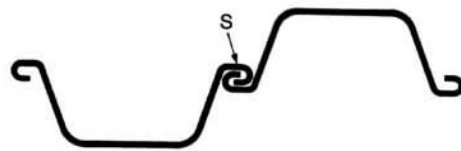
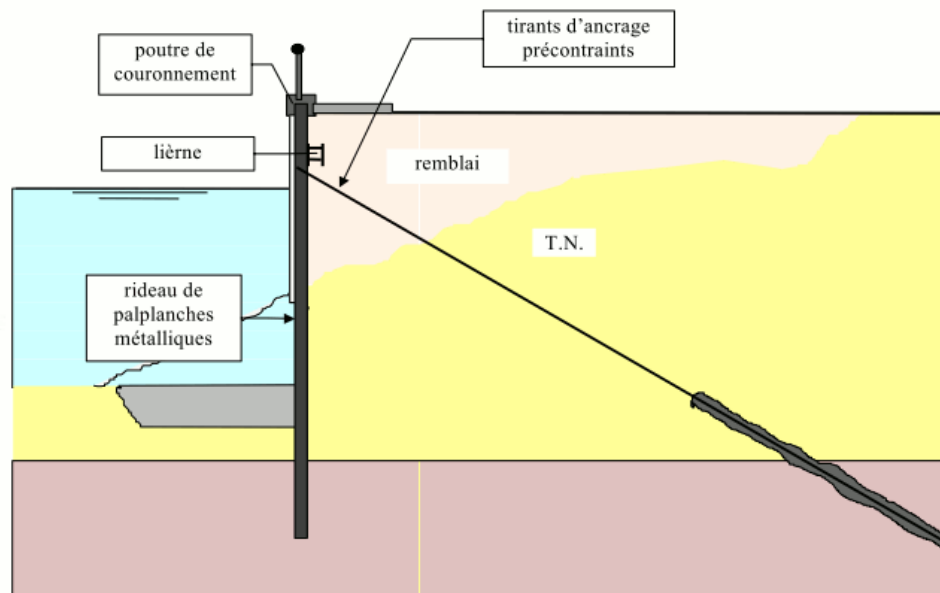
Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable,  
des Transports  
et du Logement



# Différentes techniques de soutènement

## ▪ Les rideaux de palplanches

*Rideaux continus relativement étanches, constitués de profilés métalliques assemblés par des serrures (+ butons ou tirants éventuels)*



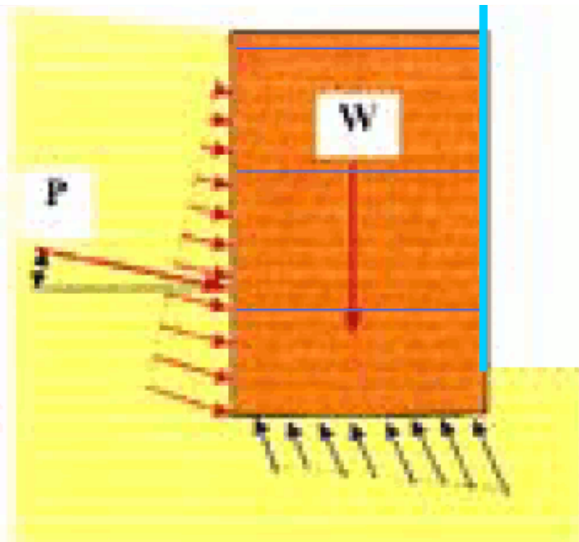
→ *Technique développée plus en détails dans la suite du cours*

# Différentes techniques de soutènement

- **Les massifs en remblai renforcé**

*Principe : faire travailler un sol d'apport, renforcé par des armatures passives, pour constituer un massif poids*

Principe de fonctionnement externe :



+ fonctionnement interne à justifier !



*Exemple : renforcement par bandes métalliques*

→ *Technique développée plus en détails dans la suite du cours*

# Différentes techniques de soutènement

- ... et bien d'autres encore !

*Parois clouées, parois berlinoises, murs caissons ou cellulaires; Texsol, ouvrages réparés, etc.*

Paroi clouée A89



Paroi berlinoise



Texsol



Mur en maçonnerie conforté par ancrages

Mur caisson « Peller »

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

# Différentes techniques de soutènement

---

## ■ Comment choisir ?

*En fonction de :*

- Mode de réalisation (déblai, remblai),
- Données géométriques (dénivellation à créer),
- Site (urbanisé, aquatique, emprises,...),
- Sol et hydrogéologie (portance, présence de nappes,...),
- Exigences architecturales, etc.

## ■ Comment dimensionner / justifier l'ouvrage ?

*La justification du soutènement nécessite de comprendre les modes de rupture auxquels on s'intéresse*



# Qu'est-ce-que la rupture ?

- Quelques exemples :



Silo

Stabi

*Enchaînement  
d'ouvrages de  
soutènement  
ne perturbant  
pas la stabilité  
d'ensemble du  
site (Pérou)*



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

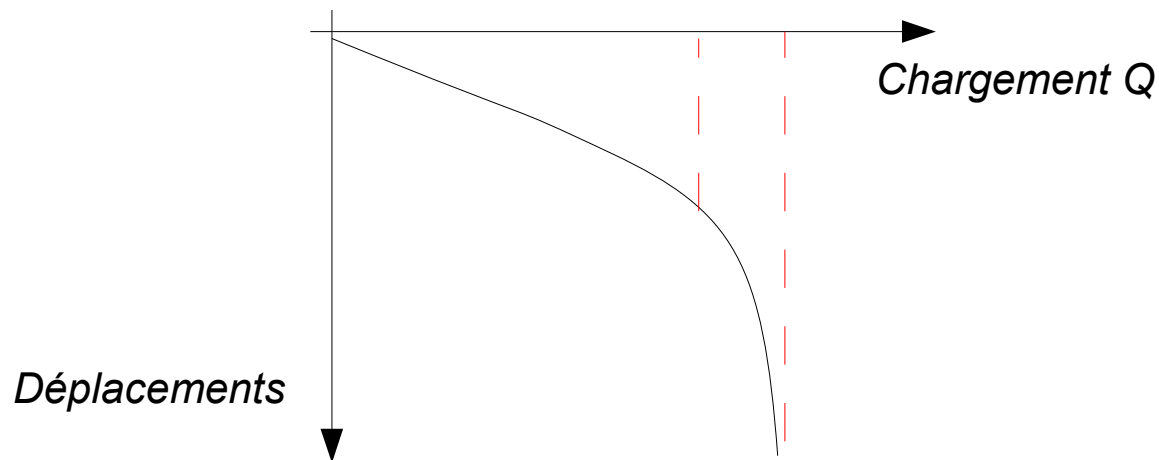


Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable,  
des Transports  
et du Logement

# Qu'est-ce-que la rupture ?

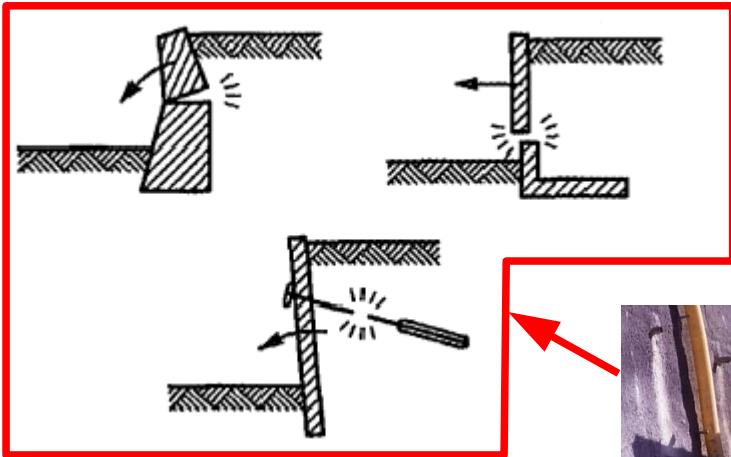
- **Définitions possibles :**

- Stade ultime (inacceptable) des déplacements d'un massif de sol ou d'un ouvrage
  - Ruine le long d'une surface préférentielle (glissement e.g.)
  - Déformation complexe du massif

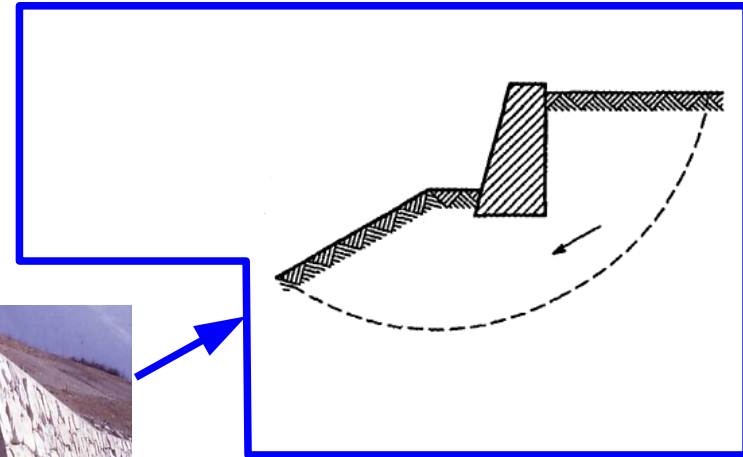


- Frontière entre les états stables et les états instables (impossibles) du massif
- **Pour un ouvrage de soutènement :**  
*Vérifier les divers modes de rupture envisageables*

# Justification du soutènement



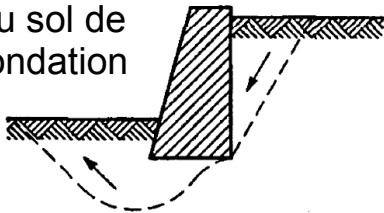
*Stabilité interne : la structure supporte-t-elle les efforts appliqués ?*



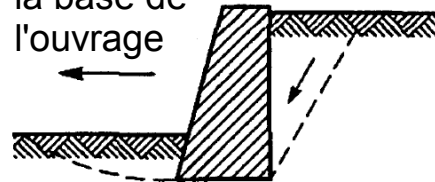
*Stabilité générale : la géométrie du site dans son ensemble est-elle stable ?*

## Ouvrage de soutènement

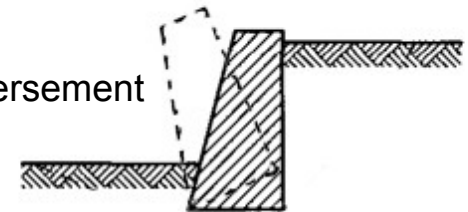
Poinçonnement du sol de fondation



Glissement sur la base de l'ouvrage



Renversement



*Stabilité externe : les efforts au voisinage de l'ouvrage (« monobloc ») sont-ils équilibrés ?*

# Plan du cours

---

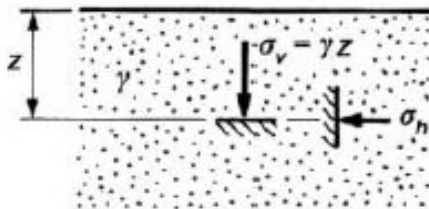
- I- Généralités sur les ouvrages de soutènement
- II- Notions de poussée et butée
- III- Calcul des murs poids
- IV- Calcul des rideaux de palplanches
- V- Notions sur les massifs en sol renforcé
- VI- Notions de pathologie des ouvrages





# Rappels de mécanique des sols

## ■ État des contraintes initiales dans le sol

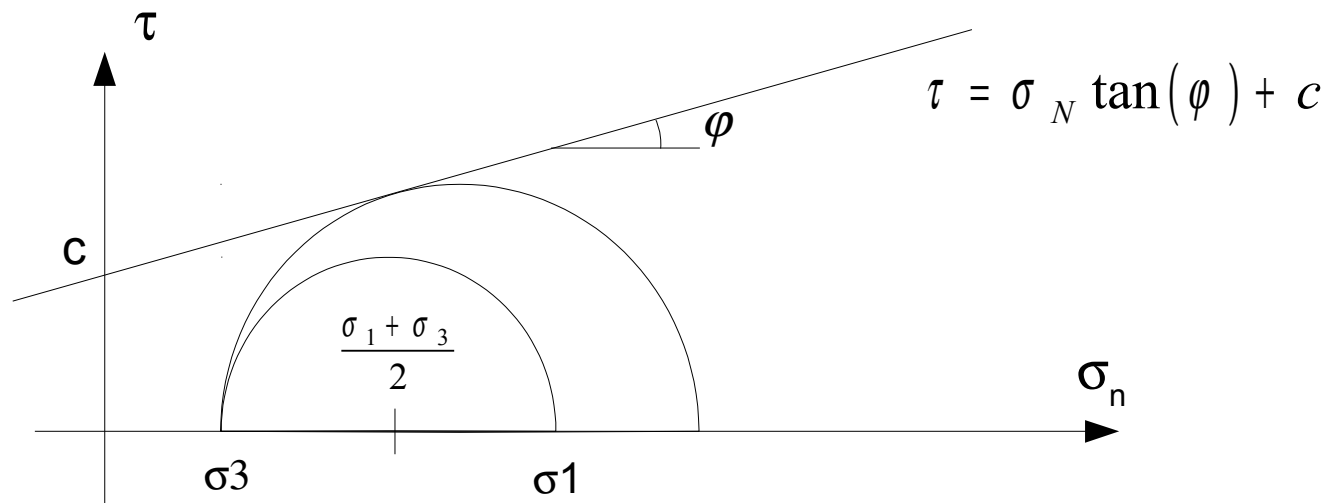


- $\sigma_V = \gamma \times z$

- *Principe des contraintes effectives* :  $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma}}' + \underline{\underline{u}}$

- *Relation contraintes verticales / horizontales* :  $\sigma_H' = K_0 \times \sigma_V'$

## ■ Cercle de Mohr et courbe intrinsèque



# Poussée et butée : approche physique

- **Expérience fondamentale :**

- **Quelques ordres de grandeur :**

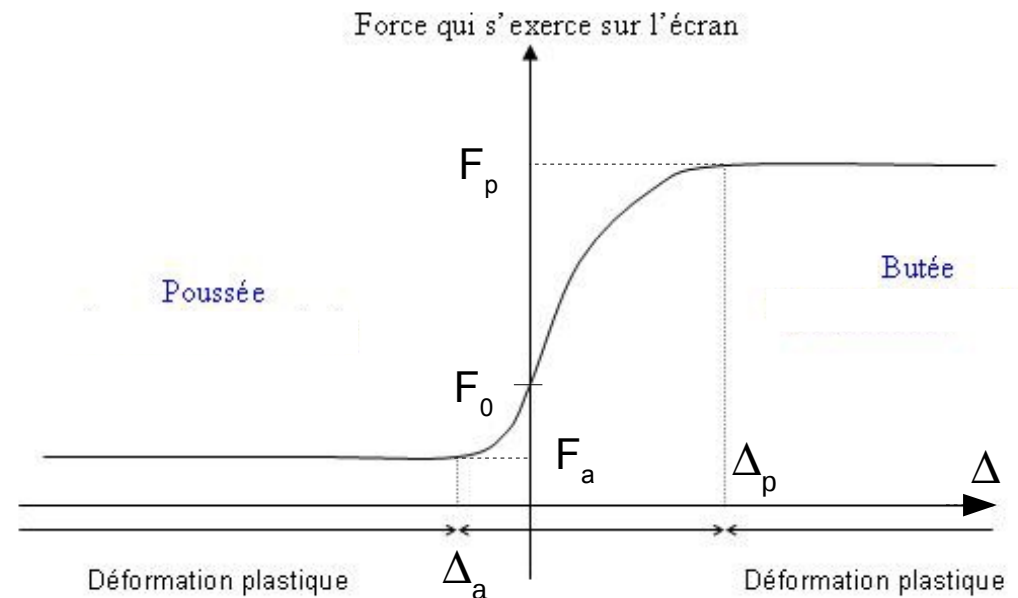
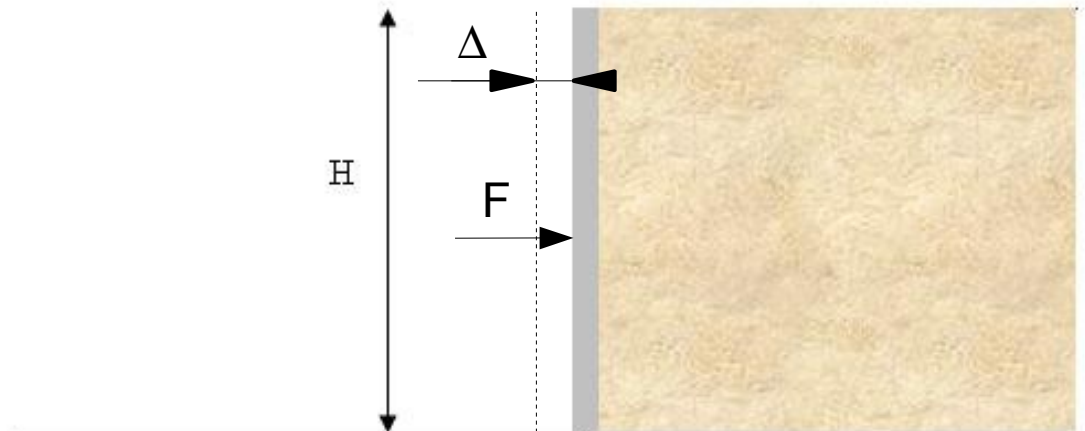
- $F_p \approx 3 \text{ à } 4 F_0$

- $F_a \approx 0,5 F_0$

- $\Delta_a \approx H / 1000$

- $\Delta_p \approx H / 100$

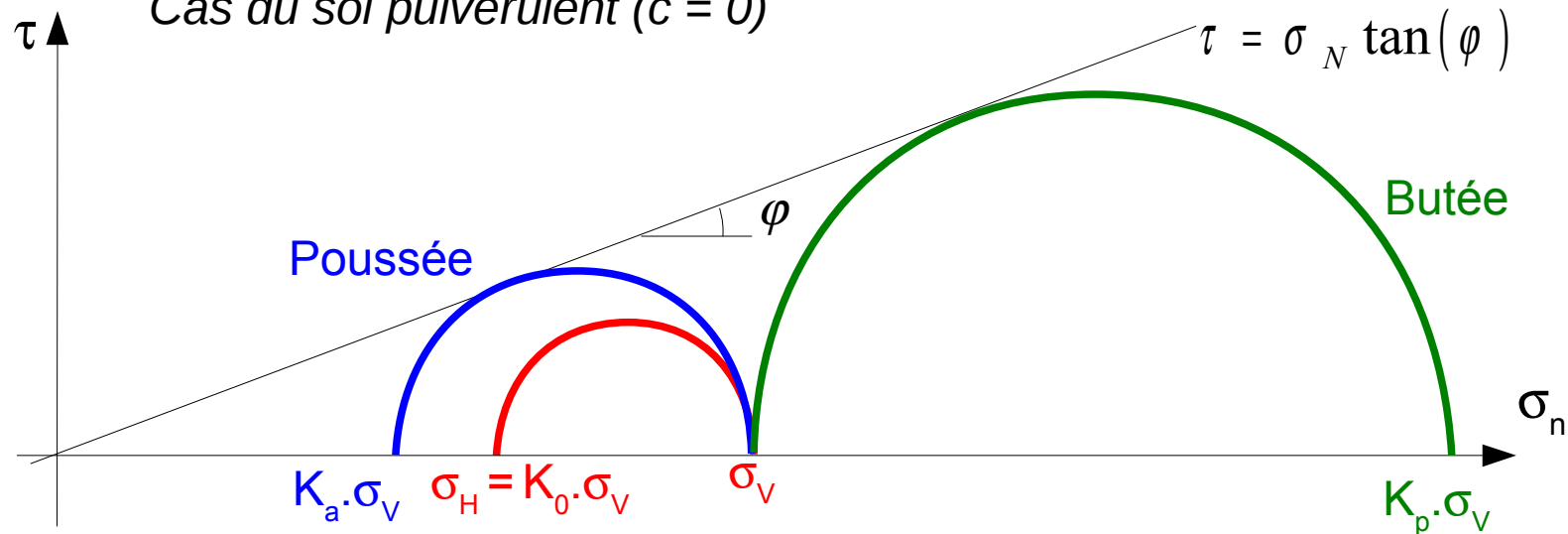
- **D'où pour un ouvrage réel...**



# Poussée et butée : formalisation

- Interprétation dans le plan de Mohr :

Cas du sol pulvérulent ( $c = 0$ )



- D'où : 
$$K_a = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad K_p = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad K_p = \frac{1}{K_a}$$

- Application :

$H = 5 \text{ m}$  ;  $\varphi = 30^\circ$  ;  $c = 0$  ;  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$  : calculer les forces  $F_0$  (pas de déplacement),  $F_a$  (équilibre de poussée) et  $F_p$  (équilibre de butée)

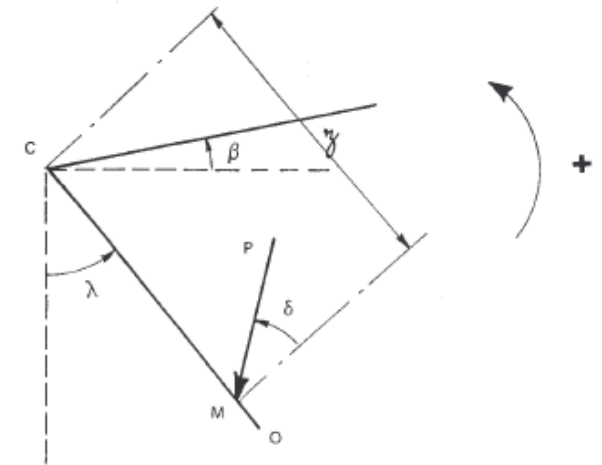
# Poussée et butée : formalisation

- On a obtenu sur ce cas simple :

$$F_a = \frac{1}{2} K_a \times \gamma \times H^2 \quad F_p = \frac{1}{2} K_p \times \gamma \times H^2 \quad \text{avec une expression simple de } K_a \text{ et } K_p$$

- MAIS** le problème peut rapidement se compliquer :

- terrain amont incliné (angle  $\beta$ )
- frottement à l'interface mur terrain (angle  $\delta$ )
- parement amont du mur incliné (angle  $\lambda$ )



- Par exemple : avec  $\beta \neq 0$ ,  $\lambda = 0$ ,  $\delta = \beta$  :

$$F_p = \frac{1}{2} K_p(\beta) \gamma H^2 \cos(\beta) \quad K_p(\beta) = \frac{\cos(\beta) + \sqrt{\cos^2(\beta) - \cos^2(\varphi)}}{\cos(\beta) - \sqrt{\cos^2(\beta) - \cos^2(\varphi)}}$$

... et certains cas importants ne sont pas solubles avec cette approche !

# Poussée et butée : en pratique...

---

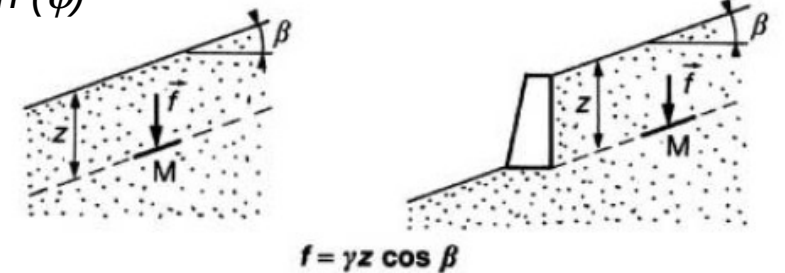
- Trois approches différentes existent en pratique :
  - *Théorie de Rankine*
  - *Théorie de Boussinesq*
  - *Théorie de Coulomb*
- Choix à faire en fonction :
  - *des limitations de chaque méthode*
  - *des approximations admissibles (géométrie)*



# L'équilibre de Rankine

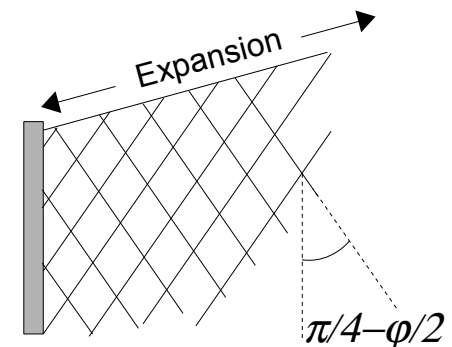
## La méthode :

- Reprend les calculs présentés précédemment
- Hypothèse principale : la présence de l'ouvrage ne modifie pas la répartition des contraintes verticales ( $\gamma.z.\cos(\beta)$ )
  - L'orientation des contraintes n'est imposée que par la géométrie ( $\beta$ ) et les caractéristiques du terrain ( $\varphi$ )



## Les limites correspondantes :

- Le frottement terrain / écran ne peut pas être pris en compte (pas de choix libre de  $\delta$ )
- Les lignes de glissement sont des droites
- Les cas solubles sont de géométrie simple (*terrain amont rectiligne notamment*)



# L'équilibre de Boussinesq

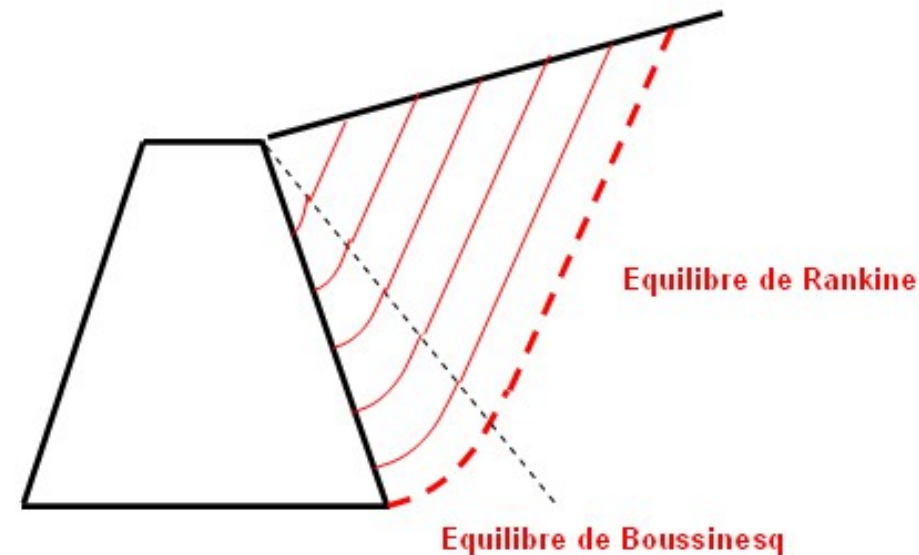
- **La méthode :**
  - Considérer un équilibre de Rankine à l'arrière du massif
  - Résoudre les équations différentielles d'équilibre, avec critère de rupture de Mohr-Coulomb, au voisinage de l'écran
  - Obtenir les résultats en fonction des conditions aux limites (frottement au contact du mur notamment).

- **Les limites correspondantes :**

Les cas solubles sont de géométrie simple (*terrain amont rectiligne, milieu homogène*)

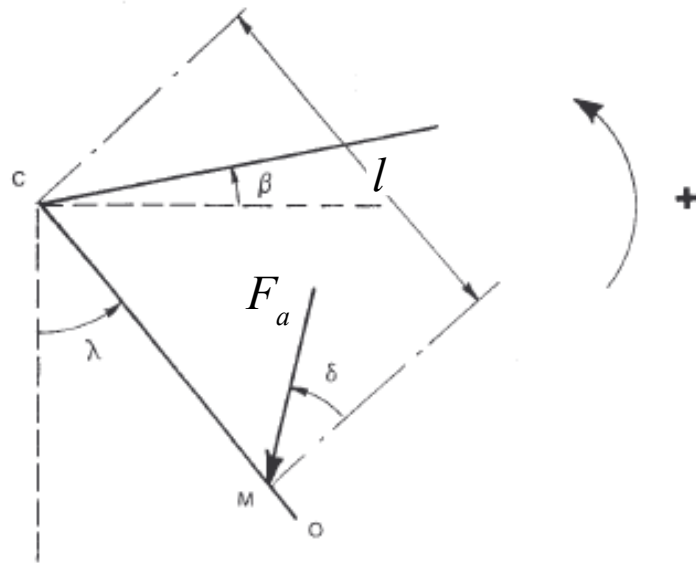
- **Les avantages :**

- Plus réaliste que Rankine seul !
- Solutions sous forme de tables (Caquot, Kérisel, Absi)



# L'équilibre de Boussinesq

- Exemple de tables de poussée de Caquot, Kerisel & Absi :



$\beta/\varphi$	$\delta/\varphi = 0$		$\delta/\varphi = +2/3$		$\delta/\varphi = +1$	
	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 10^\circ$	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 10^\circ$	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 10^\circ$
0	0,406	0,467	0,364	0,427	0,367	0,433
+ 0,4	0,464	0,544	0,422	0,504	0,428	0,515
+ 0,6	0,510	0,603	0,468	0,566	0,476	0,580
+ 0,8	0,586	0,699	0,546	0,668	0,557	0,688
+ 1,0	0,922	-	0,879	-	0,906	-

$\varphi = 25^\circ$

$\beta/\varphi$	$\delta/\varphi = 0$		$\delta/\varphi = +2/3$		$\delta/\varphi = +1$	
	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 10^\circ$	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 10^\circ$	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 10^\circ$
0	0,333	0,398	0,300	0,366	0,308	0,378
+ 0,4	0,386	0,470	0,352	0,440	0,363	0,458
+ 0,6	0,428	0,528	0,395	0,499	0,409	0,534
+ 0,8	0,500	0,624	0,469	0,602	0,488	0,634
+ 1,0	0,850	-	0,822	-	0,866	-

$\varphi = 30^\circ$

- ATTENTION :**  $K_a$  est défini tel que : 
$$F_a = \frac{1}{2} K_a \times \gamma \times l^2$$

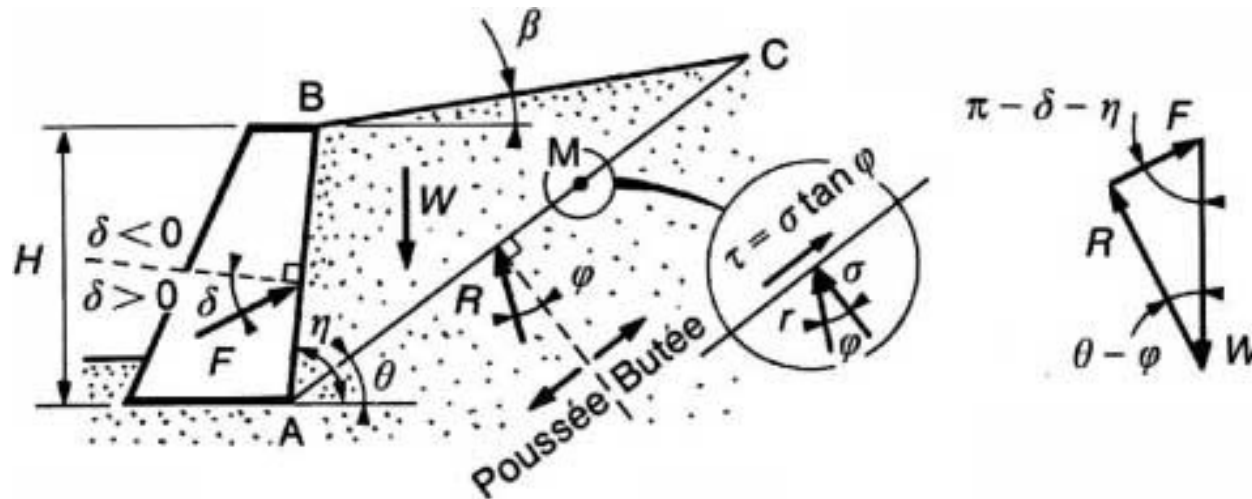
- Application :**

$H = 5 \text{ m} ; \beta = 0 ; \varphi = 30^\circ ; c = 0 ; \gamma = 18 \text{ kN/m}^3$  : calculer  $F_a$  (équilibre de poussée) pour  $\delta = 0$  et pour  $\delta = 2/3 \varphi$



# La méthode du coin de Coulomb

- **La méthode :**
  - Aucune analyse de l'état des contraintes à l'arrière du mur
  - On suppose une surface de rupture plane
  - Le « coin » isolé par cette surface est en équilibre par :
    - son poids propre  $W$
    - la réaction  $R$  exercée par le sol au niveau du plan de rupture
    - la réaction au niveau du mur  $F$  qui donne la force de poussée (d'inclinaison  $\delta$  supposée connue)



# La méthode du coin de Coulomb

- **Les limites :**

- La valeur de  $\delta$  doit être connue d'avance :

- surfaces très lisses ou lubrifiées :  $\delta = 0$

- surfaces rugueuse (béton, béton projeté, maçonnerie, acier) :  $\delta = 2/3 \varphi$

- parement fictif (murs cantilever) :  $\delta = \varphi$

- Le point d'application de  $F$  est inconnu → on suppose en général au 1/3 de la hauteur

- La méthode est indéterminée (position de la surface de rupture)

- *Rechercher la surface maximisant  $F$  par calcul direct ou itérations*

- Méthode moins satisfaisante du point de vue mécanique (pas de prise en compte de l'état des contraintes dans le sol)



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



# Quelques éléments complémentaires

---

- **... et lorsqu'il y a de la cohésion ?**

On utilise le théorème des états correspondants :

*Le milieu cohérent peut être remplacé par un milieu pulvérulent sur lequel on applique une contrainte  $H = c \cdot \cot(\varphi)$  sur toute la surface extérieure (surface libre amont, soutènement)*

- **Critères de choix des méthodes**

- *Méthode de Rankine* dans les cas simples de poussée avec massif horizontal et écran vertical sans frottement
- *Méthode de Boussinesq* avec tables dans les autres cas géométriquement simples de poussée et de butée
- *Méthode de Coulomb* dans tous les autres cas de poussée (géométries complexes notamment)



# Plan du cours

---

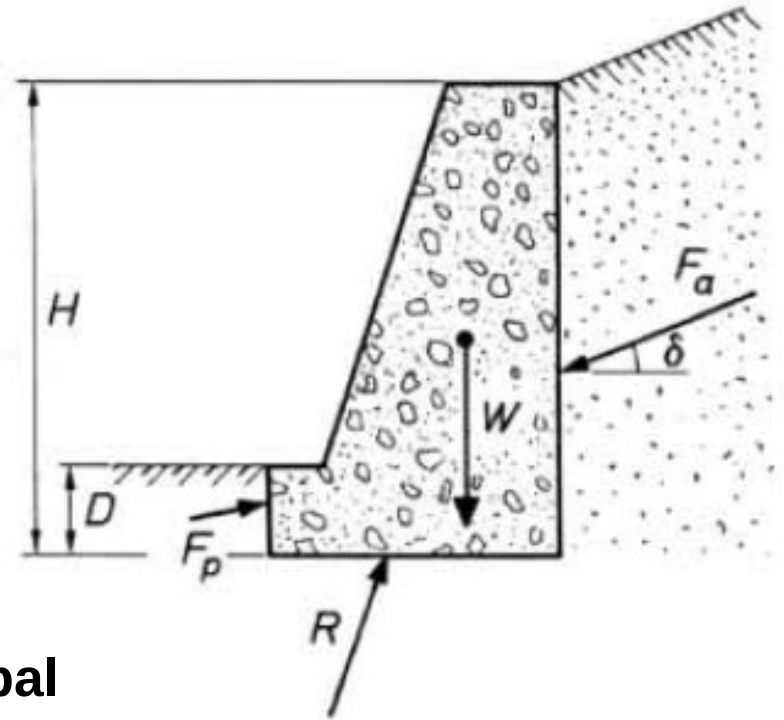
- I- Généralités sur les ouvrages de soutènement
- II- Notions de poussée et butée
- III- Calcul des murs poids
- IV- Calcul des rideaux de palplanches
- V- Notions sur les massifs en sol renforcé
- VI- Notions de pathologie des ouvrages



# Forces s'exerçant sur un mur poids

- **Bilan des forces :**

- Poids propre du mur  $W$
- Poussée des terres  $F_a$
- Butée du terrain devant le mur  $F_p$
- Réaction du sol sous la base  $R$



- **Notion de coefficient de sécurité global**

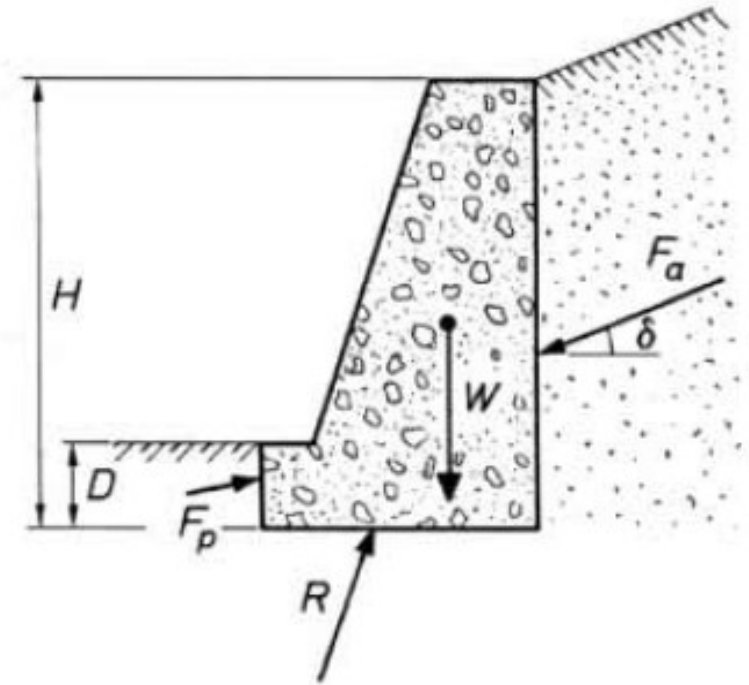
$$\Gamma = \frac{\text{effort résistant maximum}}{\text{effort moteur}}$$

- On vise usuellement  $\Gamma = 1,5$  à  $2$  pour les soutènements
- Notion remise en cause par l'Eurocode 7 → coefficients partiels !
- Envisager plusieurs situations de calcul

# Justification de l'ouvrage

## ■ Calculs préliminaires

- Calculer les différentes forces s'appliquant au mur ( $F_a$ ,  $F_p$ ,  $W$ )
- Déterminer la réaction  $R$  permettant de vérifier l'équilibre des forces
- Si nécessaire déterminer le point d'application de  $R$  par l'équilibre des moments

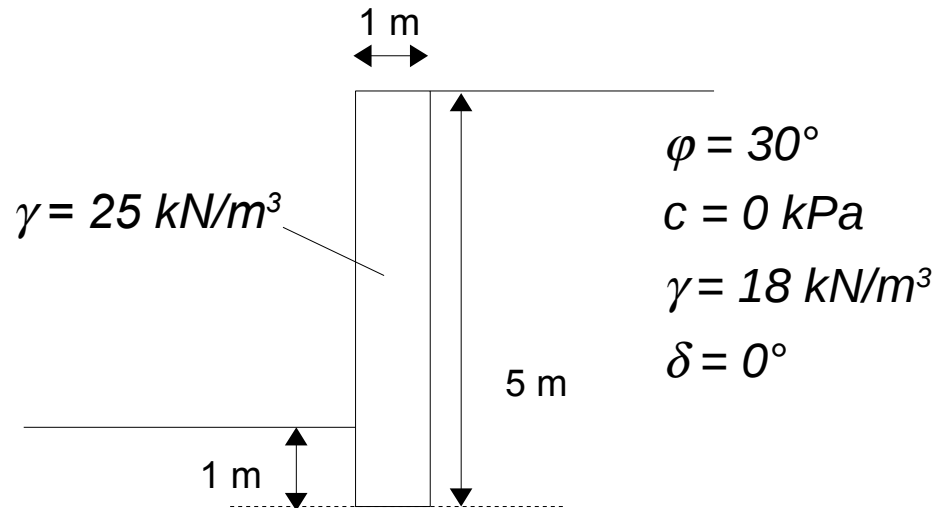


## ■ Justifications :

- Glissement sur la base : comparer la composante horizontale de  $R$  au frottement maximal mobilisable
- Renversement : bilan des moments par rapport à l'arête extérieure de la fondation ou règle du tiers central
- Ne pas oublier : poinçonnement sur la base (voir cours fondations), stabilité générale (voir cours stabilité des pentes), stabilité interne de l'ouvrage (voir cours de structures)

# Exercice d'application

- Reprise des données des exercices précédents, avec le mur suivant :



- Calculer les différentes forces s'appliquant au mur ( $F_a$ ,  $F_p$ ,  $W$ )
- Vérifier la stabilité au glissement sur la base
- Vérifier la stabilité au renversement

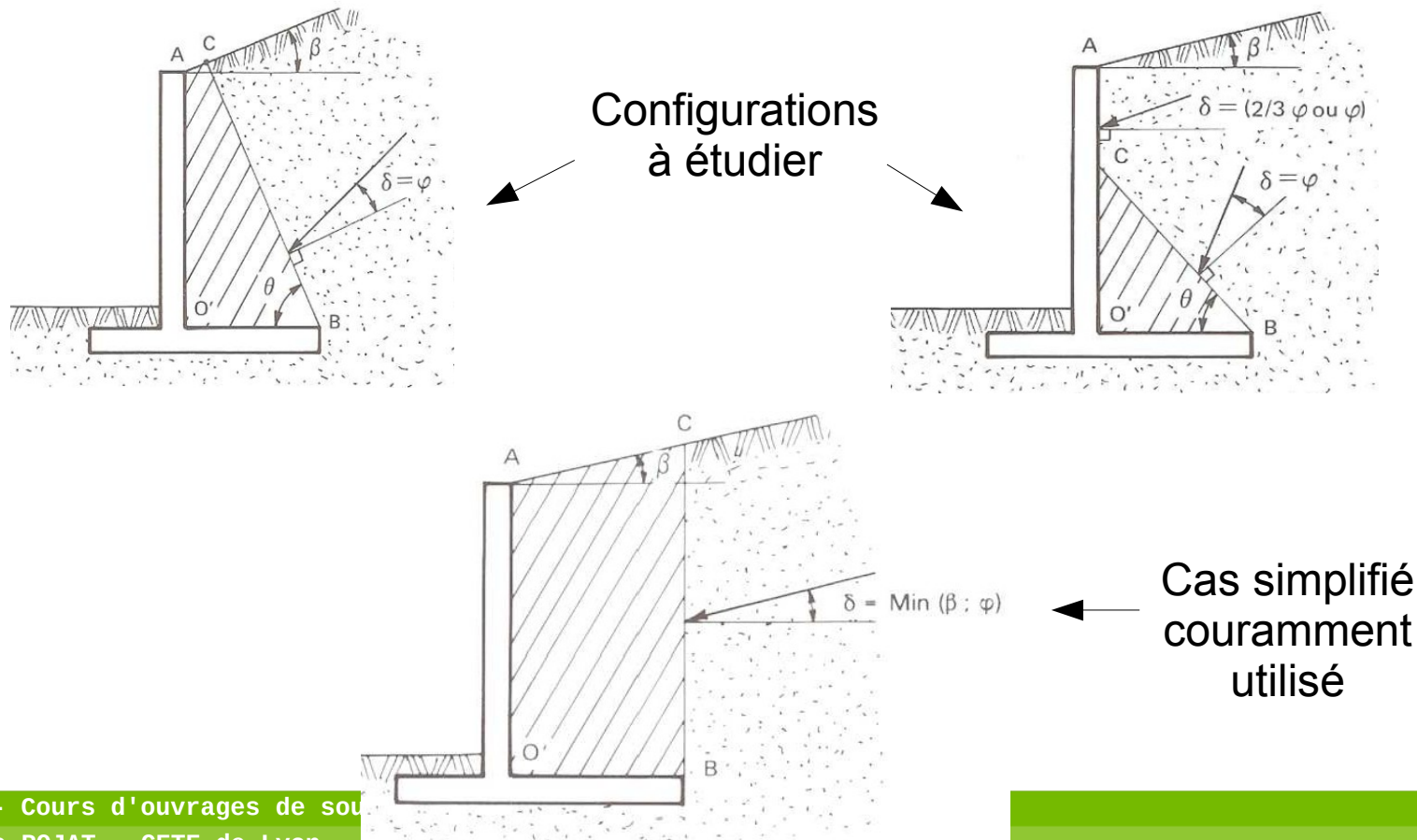
- **Que peut-on faire pour améliorer la stabilité de ce mur ?**



# Cas des murs en béton armé « cantilever » »

## ■ Principe :

- Une portion du terrain à l'arrière du mur est solidaire de l'ouvrage et ne participe pas à la poussée
- On définit un écran fictif :



# Plan du cours

---

- I- Généralités sur les ouvrages de soutènement
- II- Notions de poussée et butée
- III- Calcul des murs poids
- IV- Calcul des rideaux de palplanches
- V- Notions sur les massifs en sol renforcé
- VI- Notions de pathologie des ouvrages



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



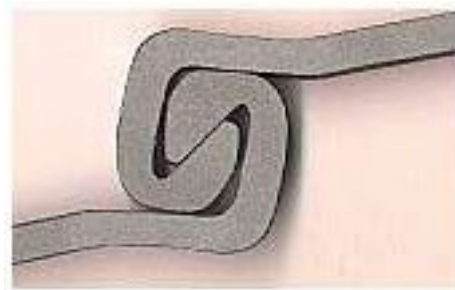
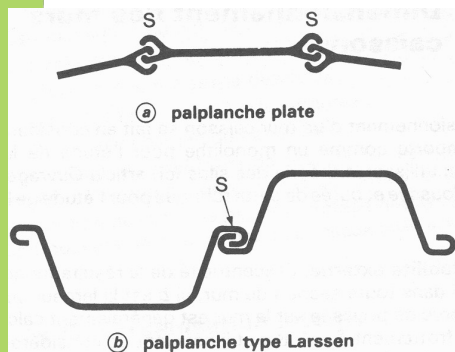
Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable,  
des Transports  
et du Logement

# Les palplanches et leur mise en œuvre

- **Les palplanches :**

- Profilés métalliques assemblés pour créer un écran souple

- Longueur max de l'ordre de 30 m



- **Les méthodes de mise en oeuvre**

- Vibrofonçage
  - Battage
  - Pression sans vibration

# Les palplanches et leur mise en œuvre

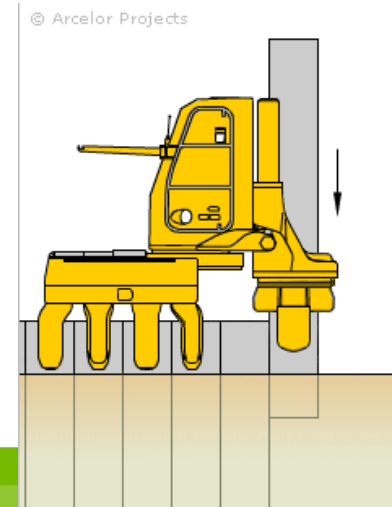
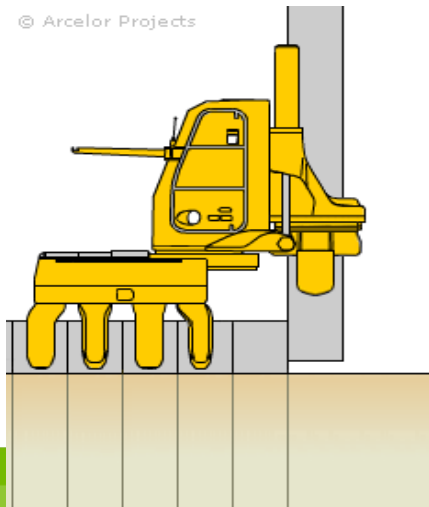


- Vibrofonçage

- Battage



- Enfouissement par pression:



Source : SETRA - IQOA



Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable,  
des Transports  
et du Logement

# Dans quel contexte ?

- **Domaine d'emploi :**

- Ouvrages en déblai ou en remblai
- Bien adaptées en présence d'eau
- Limitations principalement liées aux possibilités de pénétration dans le sol → étude géotechnique !

- **Quelques exemples de réalisations**

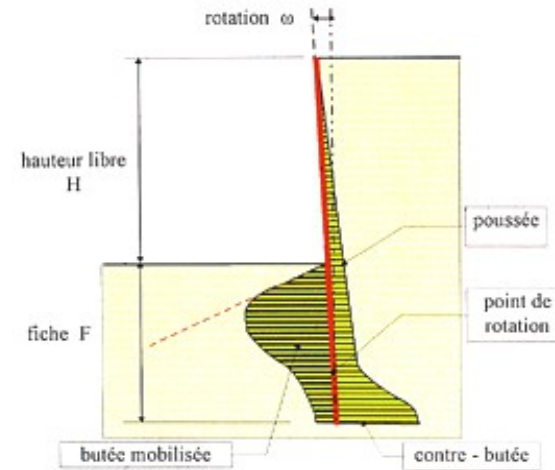
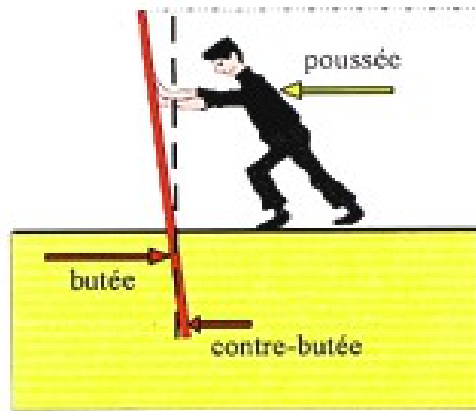
Batardeaux, Renforcements de berges, culées, soutènements provisoires, choix architectural, etc.



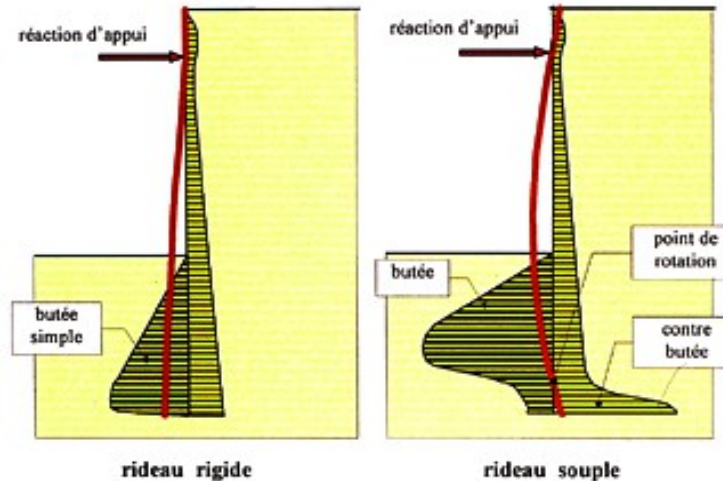
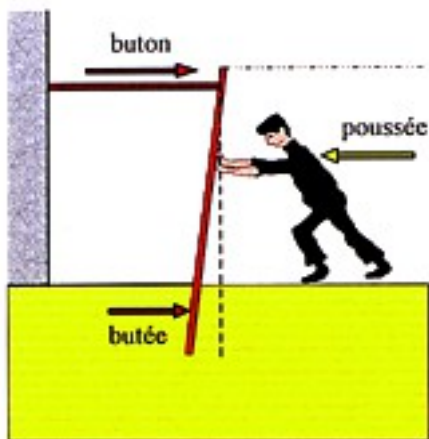
Source : SETRA - IQOA

# Fonctionnement d'un rideau de palplanches

- Cas 1 : Rideau sans ancrage, encastré ou autostable

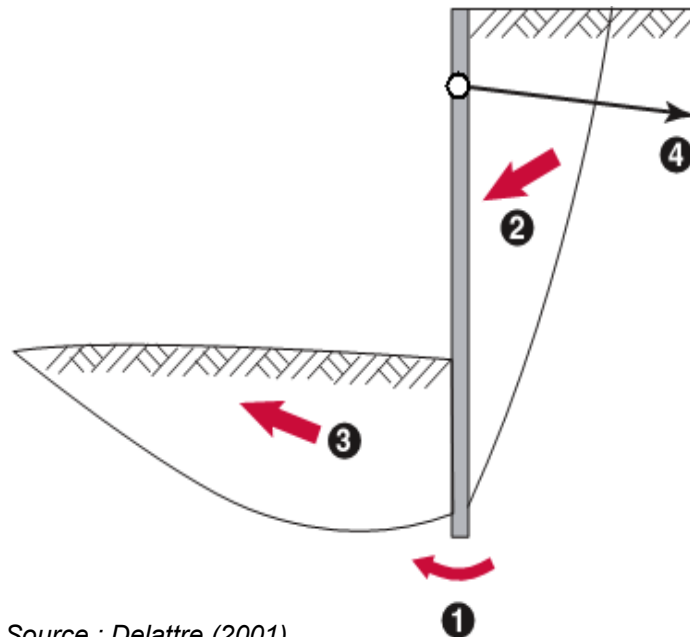


- Cas 2 : Rideau ancré ou butonné



# Méthode de calcul

- **Approche théorique générale :**
  - Devient rapidement complexe si l'on veut prendre en compte les butées, contre-butées, etc.
  - Voir méthode de Blum ou calcul aux modules de réaction dans le document de cours.
- **Un cas simple : mur ancré en tête, simplement buté en pied**



- ➊ Déplacement de l'écran
- ➋ Décompression latérale et tassement du sol soutenu
- ➌ Compression latérale et soulèvement du terrain devant l'écran
- ➍ Appui (ancrage, buton)

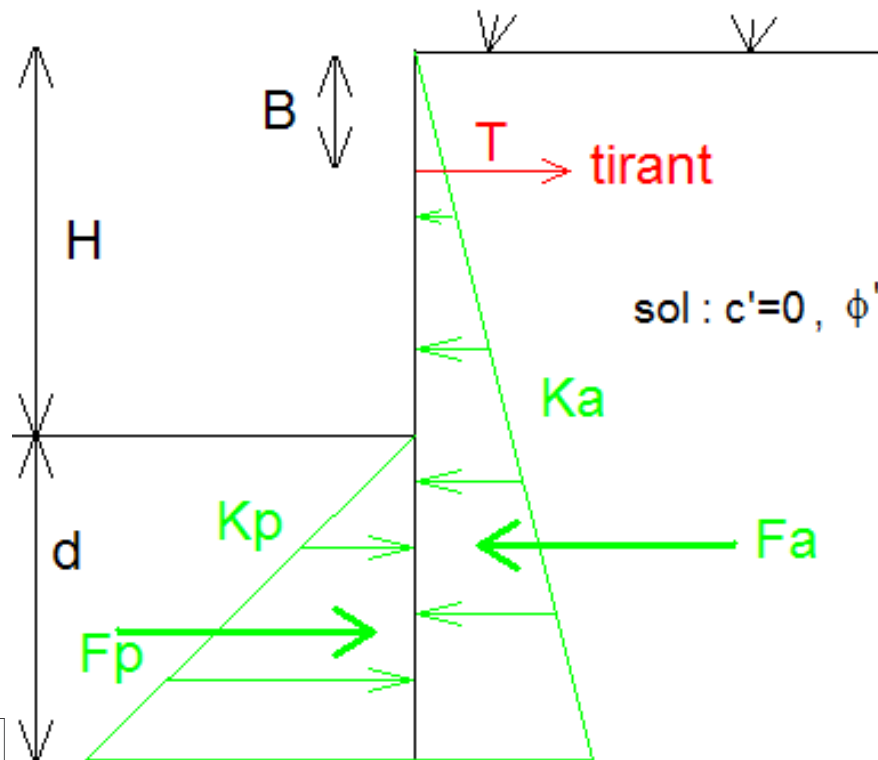
- Déterminer la fiche
- Déterminer la tension dans le tirant

Source : Delattre (2001)

# Méthode de calcul

- **Mur ancré en tête, simplement buté en pied :**

*Avec hypothèse de Rankine*



- **Calcul de la fiche d :**

*Équilibre des moments*

$$F_a \left( \frac{2}{3}(H+d) - B \right) = F_p \left( H + \frac{2}{3}d - B \right)$$

Avec :

$$\begin{cases} F_a = \frac{1}{2} K_a \times \gamma \times (d+H)^2 \\ F_p = \frac{1}{2} K_p \times \gamma \times (d)^2 \end{cases}$$

- **Calcul de la force T :**

$$F_a = T + F_p$$

- **Application :** Idem exercice mur poids, avec tirant à 1 m sous la surface



# Le risque de renard hydraulique

- Principe...
- Quelques images :



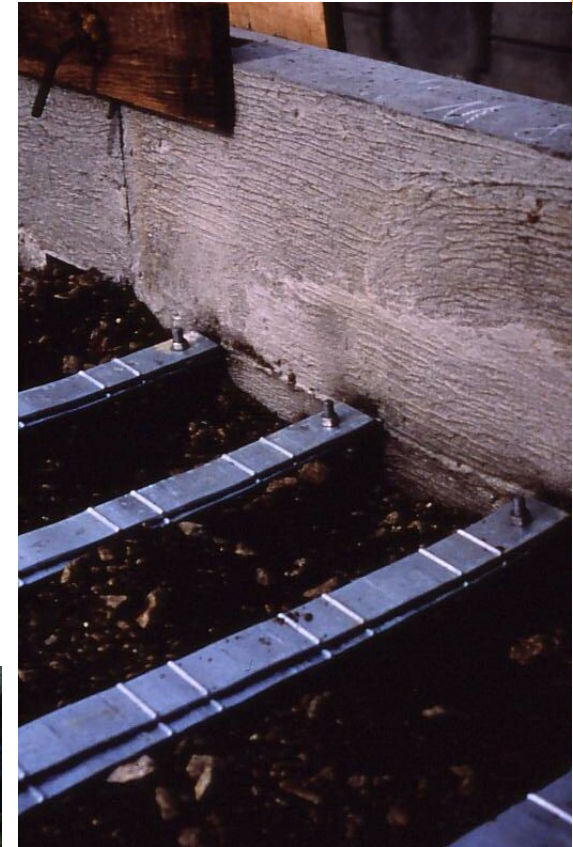
# Plan du cours

---

- I- Généralités sur les ouvrages de soutènement
- II- Notions de poussée et butée
- III- Calcul des murs poids
- IV- Calcul des rideaux de palplanches
- V- Notions sur les massifs en sol renforcé
- VI- Notions de pathologie des ouvrages

# Quelques exemples...

- **Terre armée / renforcement par bandes métalliques**



Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable,  
des Transports  
et du Logement

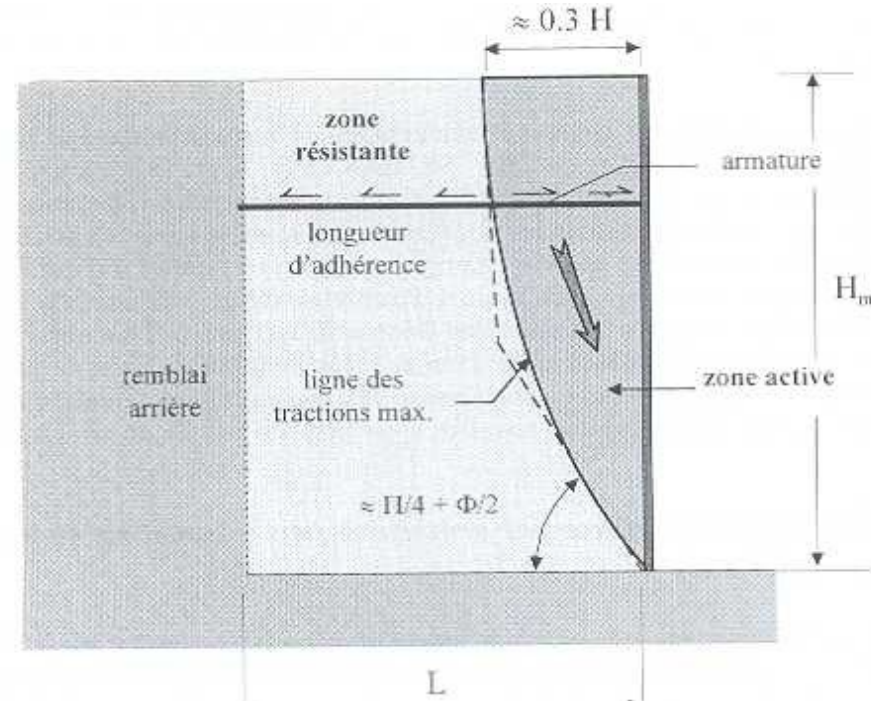
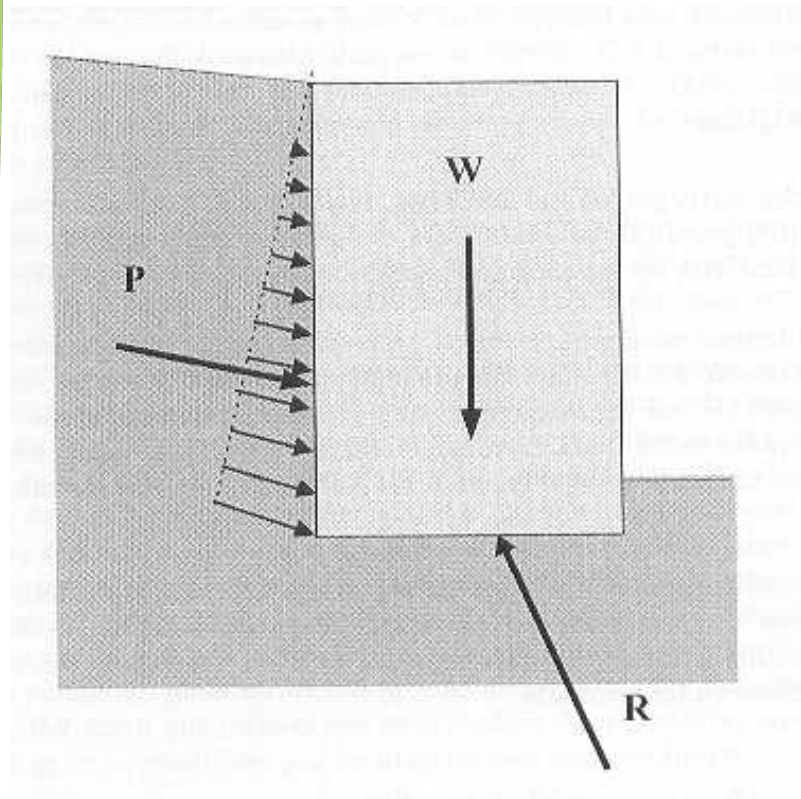
# Quelques exemples...

- Renforcement par nappes géosynthétiques



# Principe de fonctionnement

- **Fonctionnement externe et interne :**



- **Attention aux conditions d'agressivité du milieu !**

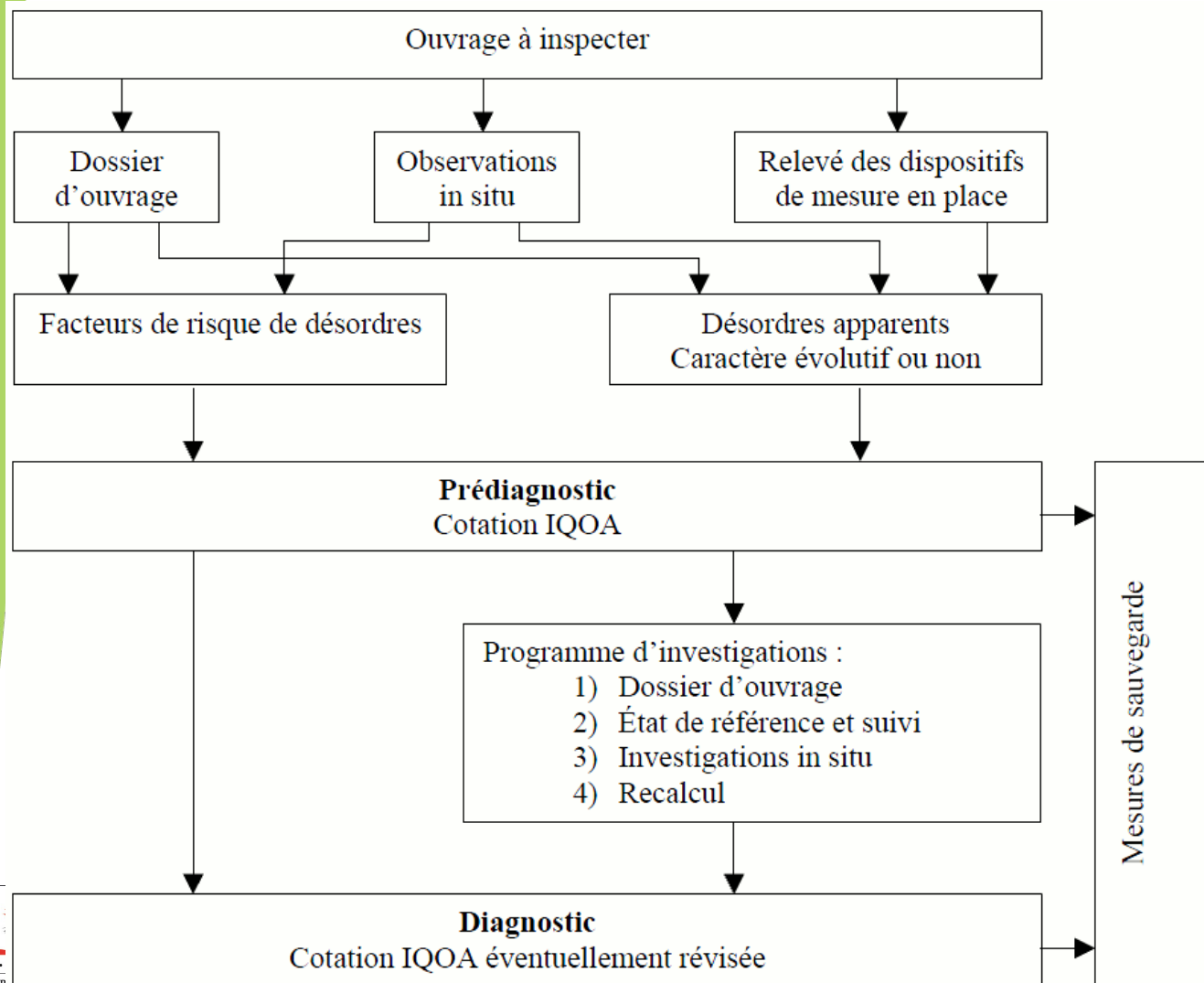
# Plan du cours

---

- I- Généralités sur les ouvrages de soutènement
- II- Notions de poussée et butée
- III- Calcul des murs poids
- IV- Calcul des rideaux de palplanches
- V- Notions sur les massifs en sol renforcé
- VI- Notions de pathologie des ouvrages



# Diagramme pour le diagnostic d'un mur de liste II



*Trappe de visite*

# Quelques exemples...





# Quelques exemples...

---



# L'essentiel...

---

- Connaître les grands types d'ouvrages de soutènement et sommairement leur méthode de réalisation
- Connaître le principe des trois méthodes de calcul de poussée-butée et leurs limites
- Savoir calculer un mur poids simple
- Savoir calculer un rideau de palplanche ancré en tête et simplement buté en pied
- Connaître le principe général de fonctionnement d'un ouvrage en sol renforcé
- Les ouvrages de soutènements sont inspectés, de manière régulière et méthodique ; leurs pathologies doivent être traitées !