

## 1.8. Combinaisons d'actions

ELU durable  $\sum_i \gamma_i G_i + 1.5Q + 1.3 \sum_{i>1} \Psi_{0i} Q_i$

ELU accidentelle  $\begin{cases} G + Q \pm E \\ 0.8G \pm E \end{cases}$

ELS  $\sum_i G_i + Q + 1.3 \sum_{i>1} \Psi_{0i} Q_i$

$G_i$  - charge permanente (favorable  $G_{min}$  et défavorable  $G_{max}$ )

$Q$  - Charge d'exploitation de base

$Q_i$  - Charge d'exploitation d'accompagnement.

Les coefficients utilisés dépendent des situations de calcul (équilibre interne: ferrailage, ou stabilité externe: glissement et renversement).

### 1.8.1. Justification de la résistance interne du mur (Ferrailage)

Pour ce calcul, les coefficients de sécurité dans les combinaisons de calcul prennent les valeurs suivantes :

$\gamma_i = 1.35$  Pour toutes les charges permanentes (favorables et défavorables).

$\Psi_{0i}$  Coefficients pour charges d'exploitations d'accompagnements (norme NF EN 1990/A1).

Il faut rappeler que pour les vérifications relatives à la résistance interne, la poussée active des terres et celle due aux charges d'exploitation sur le terre-plein sont supposées s'exercer directement sur le parement intérieur du mur, avec un angle d'inclinaison nul  $\delta = 0$  sur la normale au parement (Fig. 14).

Si le voile est incliné  $\lambda \neq 0$  la composante verticale de la poussée est négligée. Cette simplification va dans le sens de la sécurité.

Remarque:

A l'ELU durable, utiliser Caquot-Kérisel pour déterminer  $k_a$ .

A l'ELU accidentel, utiliser RPA qui stipule que :

- Les murs de soutènement en béton armé dont la hauteur est inférieure ou égale à 6 mètres peuvent être justifiés sous sollicitations sismiques avec un calcul statique équivalent.

- La vérification de la stabilité est effectuée par application de deux coefficients sismiques

$k_h = A (\%g)$  et  $k_v = \pm 0,3k_h$  au mur et au remblai retenu ainsi qu'aux charges d'exploitation éventuelles supportées par le remblai selon les combinaisons  $(k_h, k_v)$  et  $(k_h, -k_v)$ . (Forces d'inertie verticale et horizontale sur toutes les charges gravitaires):

$$\begin{cases} F_v = k_v W \\ F_h = k_h W \end{cases}$$

Le coefficient A est le coefficient d'accélération de zone choisi en fonction de la zone sismique et du groupe d'importance de l'ouvrage situé en amont ou en aval du mur. (En absence d'ouvrage, il y a lieu de choisir la valeur de A correspondant à celles du groupe 2 en fonction de la zone sismique).

- La poussée active dynamique globale qui s'exerce à l'arrière du mur peut être évaluée par l'expression:

$P_{ad} = \frac{1}{2} k_{ad} (1 \pm k_v) \rho H^2$  appliquée horizontalement à  $H/3$  au dessus de la base de la semelle du mur (répartition triangulaire).

$k_{ad}$  = coefficient de poussée dynamique donné par :

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

- $\rho$  : poids volumique du sol de remblai
- $\phi$  : angle de frottement interne du remblai sans cohésion
- $H$  : hauteur de la paroi verticale à l'arrière du mur sur laquelle s'exerce  $P_{ad}$
- $\beta$  : angle de la surface du remblai sur l'horizontale
- $\theta = \arctg(k_h / (1 \pm k_v))$ .

Lorsque le remblai supporte une surcharge verticale uniforme  $q$ , la poussée dynamique est égale à :  $P_{qd}(q) = k_{ad} (1 \pm k_v) qH / \cos \beta$ , appliquée horizontalement à  $H/2$  au dessus de la base de la semelle du mur.

### Calcul des sollicitations internes

Le calcul du mur (par ml) revient à calculer :

- Le rideau comme une console encastrée dans la semelle sous l'effet de la poussée des terres.
- La semelle avant (patin) comme une console soumise à la réaction du sol.
- La semelle arrière (talon) comme une console (sous l'effet du poids des terres et de la réaction du sol).

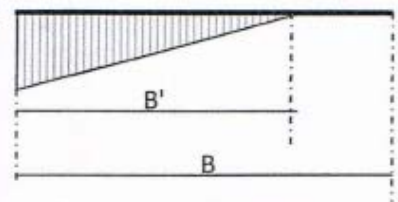
NB : Pour le calcul de la réaction du sol sous la semelle, on suppose que le sol est élastique et la semelle infiniment rigide (donc répartition linéaire des contraintes sous la semelle). Il est préférable aussi de dimensionner la semelle de façon à avoir une répartition trapézoïdale.

**Rappel :** Pour le calcul de la réaction du sol sous une semelle de largeur  $B$ :

On calcul  $M_A$  et  $N_{TOT}$   $e_A = \frac{M_A}{N_{TOT}}$  ou :  $M_G$  et  $N_{TOT}$   $e_G = \frac{M_G}{N_{TOT}}$  et on vérifie :

- Répartition trapézoïdale si  $e_A > \frac{B}{3}$  OU  $e_G < \frac{B}{6}$
- Répartition triangulaire si  $e_A \leq \frac{B}{3}$  OU  $e_G \geq \frac{B}{6}$

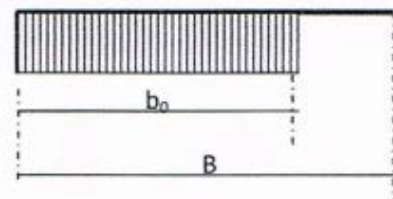
$$B' = \begin{cases} 3 e_A \\ \text{OU} \\ \frac{3}{2} (B - 2 e_G) \end{cases}$$



Cependant, pour le ferrailage de la semelle, on adopte souvent la méthode de Meyerhof qui suppose que la contrainte  $\sigma$  sous la semelle est uniforme sur une largeur  $b_0$ . Donc :

$$\sigma = \frac{F_V}{b_0}$$

$$b_0 = 2 \cdot e_A \text{ OU } b_0 = B - 2 \cdot e_G$$



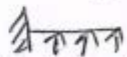
où  $F_V$  la somme des forces verticales (résultante des forces verticales).

## Ferraillage Principal

**Rideau** : Le rideau est ferrailé comme une dalle verticale à la flexion composée sous l'effet de la poussée des terres et son poids propre (M et N). Cependant, comme le poids provoque généralement un effort normal assez faible, il est souvent ferrailé à la flexion simple.

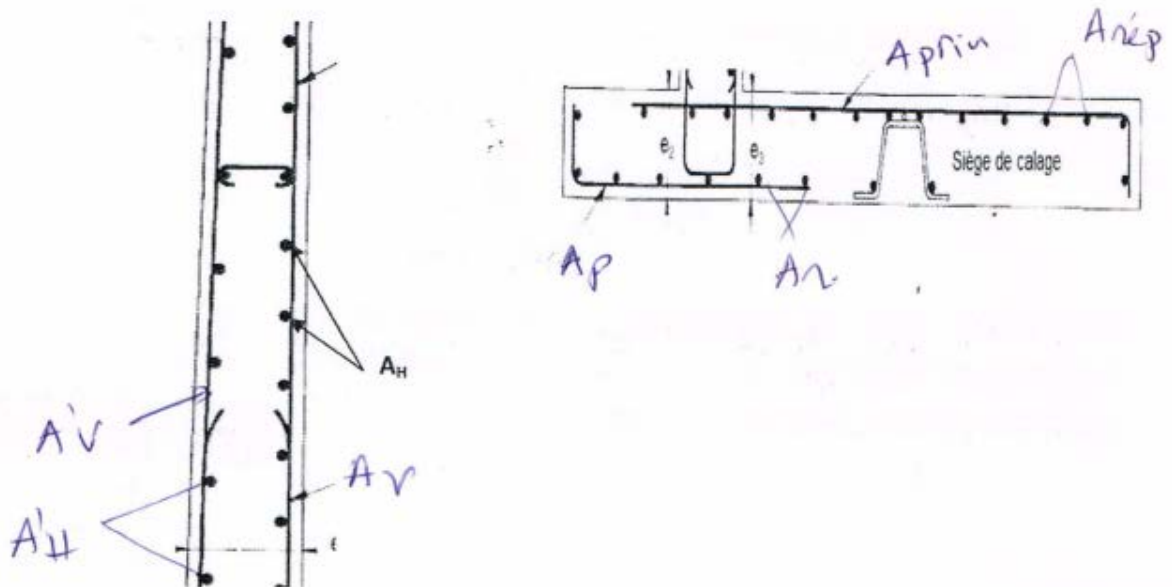
**N.B** : Comme la fissuration est très souvent nuisible ou très nuisible, l'ELS est plus déterminant que l'ELU de la situation durable (calcul ELS et ELU accidentel).

## Semelle :

- La semelle avant est ferrailée comme une dalle à la flexion simple sous l'effet de la réaction du sol (charge uniforme)  $\sigma$ . 
- La semelle arrière est ferrailée comme une dalle à la flexion simple sous l'effet de la réaction du sol (charge uniforme)  $\sigma$ , du poids des terres sur la semelle et de la surcharge  $q$ .

## NB :

- ✓ Si la semelle comporte une bêche, le ferrailage forfaitaire de 4HA10 et des cadres de diamètre de 6mm avec espacement de 20 à 25 cm est adopté.
- ✓ Si le mur à contrefort, la semelle sera calculée comme appuyée sur le rideau et la bêche.
- ✓ La bêche sera calculée comme poutre continue appuyée sur le contrefort sous l'effet de la réaction de la semelle.



## Ferraillage secondaire

La section des armatures de répartition :

- Sur la face interne du rideau (côté terres)  $A_H \geq 0.10 e_{\text{rideau}}$  [cm<sup>2</sup>/m]

avec  $e_{\text{rideau}}$  l'épaisseur du rideau (en cm) à l'encastrement sur la semelle.

- Sur la face externe du rideau : mettre des armatures verticales  $A_V$  et horizontales  $A'_H$  avec  $\begin{cases} A_V \geq 0.10 e_{\text{rideau}} \\ A'_H \geq 0.075 e_{\text{rideau}} \end{cases}$
- dans la semelle  $A_R \geq 0.10 e_{\text{semelle}}$

Il est conseillé de mettre en tête du rideau une section d'acier de chaînage en U renversé de  $3.85 \text{ cm}^2/\text{m}$ .

## **JUSTIFICATION DE LA RESISTANCE EXTERNE DU MUR (stabilité)**

La justification concerne :

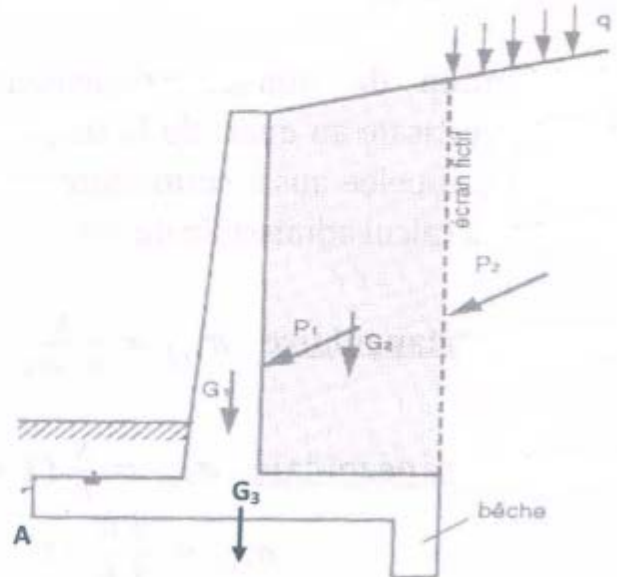
- la stabilité au glissement
- la stabilité au renversement
- la résistance du sol sous la semelle (portance du sol ou non-poinçonnement)

Les coefficients de sécurité utilisés dans la combinaison **ultime durable** prennent les valeurs :

$$\gamma_i = \begin{cases} 1.35 \text{ pour l'action de la poussée (pour corriger l'incertitude sur } k_a) \\ 1.1 \text{ pour l'action du poids défavorable à la stabilité (déstabilisant)} \\ 0.9 \text{ pour l'action du poids favorable à la stabilité (stabilisant)}. \end{cases}$$

## 1. Stabilité au glissement

Il faut vérifier que la somme des forces horizontales (déstabilisantes) est inférieure à la somme des forces verticales (stabilisantes). On retrouve les expressions suivantes (figure 13):



$$\text{A L'ELS : } F_H \leq \frac{F_V \tan \varphi'}{1.5}$$

Avec  $F_H$  - la somme des forces horizontales et  $F_V$  la somme des forces verticales.

$$\text{ELU Durable : } 1.35 P_1 + 1.5 P_2 \leq 0.9 (G_1 + G_2 + G_3) \tan \varphi'$$

$\varphi'$  est l'angle de frottement interne du terrain

**NB:** L'action verticale de la charge  $q$  est négligée dans la vérification à l'ELU

$$\text{ELU Accidentel : } P_1 + P_2 \leq \frac{(G_1 + G_2 + G_3) \tan \varphi'}{1.2}$$

## 2. Stabilité au renversement

La justification de non renversement du mur consiste à montrer que le moment stabilisateur  $M_{S/A}$  est supérieur au moment renversant  $M_{R/A}$ .



## 2. Stabilité au renversement

La justification de non renversement du mur consiste à montrer que le moment stabilisateur  $M_{S/A}$  est supérieur au moment renversant  $M_{R/A}$ .

$$\text{ELS : } \frac{\sum M_{stab}}{\sum M_{renv}} \geq 1.5$$

$$\text{ELU Durable : } 0.9 (M_{G1} + M_{G2} + M_{G3}) \geq 1.35M_{P1} + 1.5M_{P2}$$

$$\text{ELU accidentel : } (M_{G1} + M_{G2} + M_{G3}) \geq 1.3 (M_{P1} + M_{P2})$$

## 3. Vérification du non-poinçonnement

La justification du non-poinçonnement consiste à s'assurer que la contrainte verticale au quart de la largeur comprimée de la semelle (selon répartition), appelée aussi *contrainte de référence*, est au plus égale à la contrainte de calcul admissible du sol.

$$\text{Répartition triangulaire } \sigma_{ref} = \frac{N}{B-2e_G} \text{ OU } \sigma_{ref} = \frac{N}{2e_A}$$

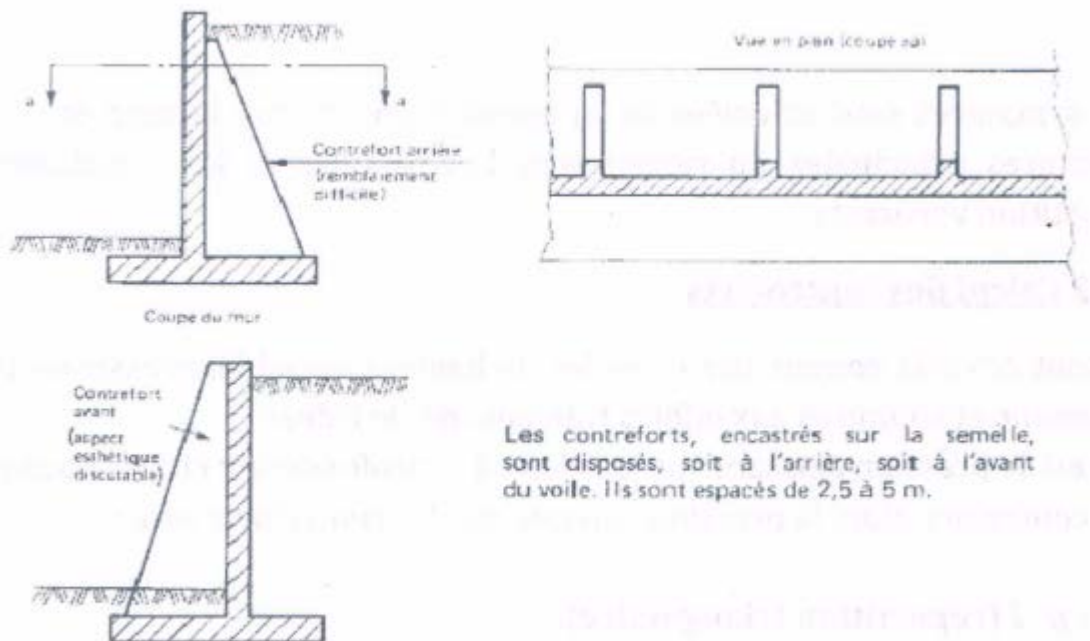
$$\text{Répartition trapézoïdale } \sigma_{ref} = \frac{N}{B} \left(1 + 3 \frac{e_G}{B}\right) \text{ OU}$$
$$\sigma_{ref} = \frac{5N}{2B} \left(1 - 1.2 \frac{e_A}{B}\right)$$

Il faut vérifier que :  $\sigma_{ref} \leq \bar{\sigma}_{sol} \cdot e^{-\delta_R}$

avec  $\delta_R$  - en radians et  $\tan \delta_R = \frac{F_H}{F_V}$

## MURS A CONTREFORTS

Lorsque la hauteur du mur devient importante ou que les coefficients de poussée sont élevés, le moment d'encastrement du mur dans la semelle devient important. Les contreforts permettent de raidir le mur et d'augmenter sa stabilité au renversement (figure 4).



### Murs à contreforts

Ces contreforts, encastrés sur la semelle et liés au voile, sont disposés à intervalles réguliers (2,5 à 5 m).

### Calcul des murs à contreforts

#### Calcul du rideau

Le rideau est considéré comme une dalle semi-encastree sur les contreforts (dalle sur 2 appuis parallèles) et soumise à une charge horizontale due à la poussée des terres. Pour le calcul, on décompose le rideau en tranches de 1m de hauteur à partir du sommet et on admet que cette tranche est soumise à une pression constante égale à celle régnant à la base de cette tranche (ou celle régnant au milieu de la tranche).

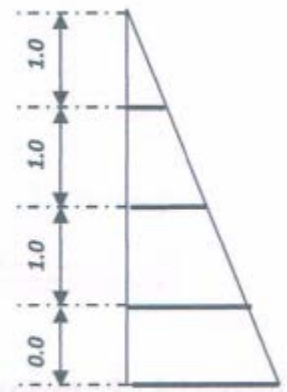
Les moments de flexion au centre de ces tranches:

$$M_0 = \frac{p l^2}{8}$$

$p$  est la pression calculée dans chaque tranche

$l$  est l'entre-axes des contreforts

$$\begin{cases} \text{En travée} & M_t = 0.8 M_0 \\ \text{En appuis} & M_a = -0.5 M_0 \end{cases}$$



Les armatures sont calculées de la même manière que le mur en T. Les armatures principales du rideau sont horizontales et les armatures de répartition verticales.

### 2.1.2 Calcul des contreforts

Ils sont calculés comme des consoles de hauteur variable, encastrées dans la semelle et soumises aux efforts transmis par le rideau.

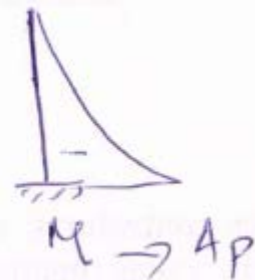
Si  $p$  est la pression agissant sur le rideau à la profondeur  $z$  et  $l$  l'espacement des contrefort, alors la pression agissant sur les contreforts sera :

$$p' = p \cdot l \text{ (répartition triangulaire).}$$

$$\text{A la base : } p' = k_a \cdot \rho \cdot H \cdot l;$$

Le moment max (par rapport à l'encastrement) sera:

$$M = p' \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{H}{3}$$





Leur ferrailage se fera en flexion simple comme des sections en T (la table de compression étant constituée par le rideau).

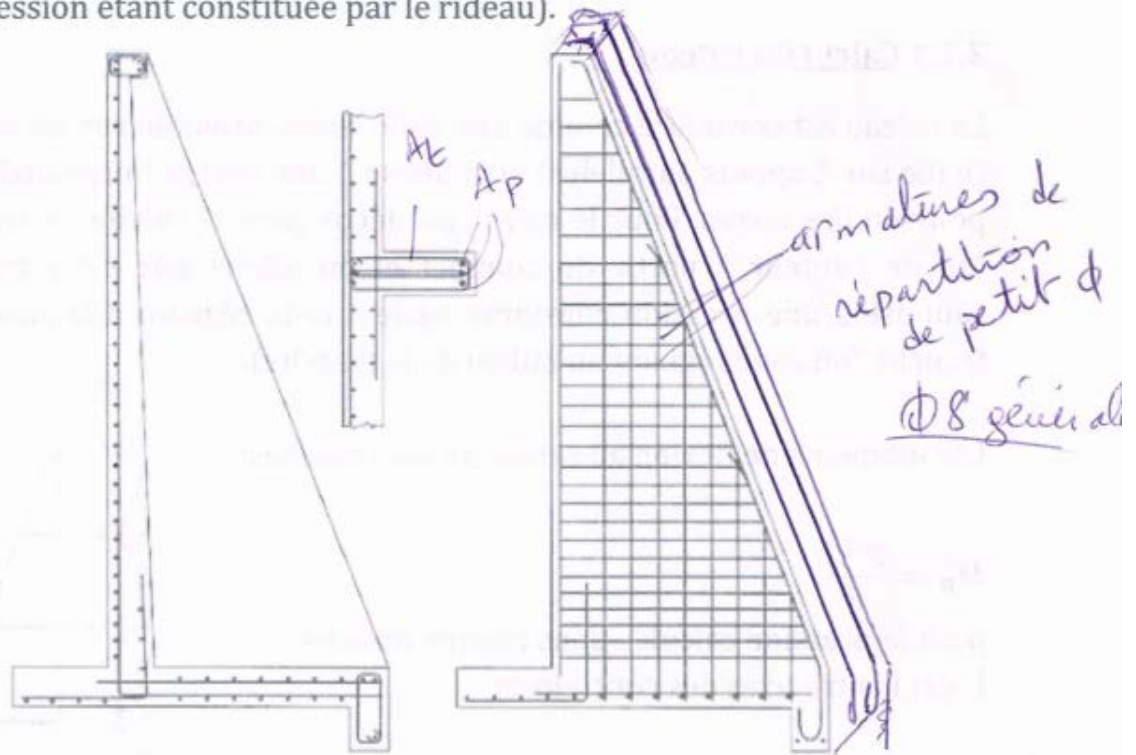


Figure14 : Exemple de Schéma de ferrailage des murs à contrefort