

Ouvrage hydraulique

Table des matières



| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| I - Objectif et Pre-requis | 3 |
| 1. objectif de cours | 3 |
| 2. Pre-requis | 3 |
| 3. Introduction | 3 |
| II - Stabilité des barrages en terre | 5 |
| 1. Facteur de sécurité | 6 |
| 2. Etude de stabilité des talus : | 7 |
| 3. Etude de l'équilibre d'un talus de barrage par la méthode de Fellenius | 9 |
| 3.1. - <i>Prise en compte de la sismicité dans le calcul de stabilité</i> | 11 |
| 4. Conditions d'analyse | 12 |
| 5. Détermination des cercles de glissement : | 14 |
| III - Application | 16 |
| IV - Solution | 17 |

Objectif et Pre-requis

| | |
|-------------------|---|
| objectif de cours | 3 |
| Pre-requis | 3 |
| Introduction | 3 |

1. objectif de cours

Objectifs à atteindre :

A la fin de ce cours l'étudiant sera capable de :

- *Distinguer* le type de glissement des talus et poser les conditions de déformations qui causent ce glissement.
- *Détermination* des cercles de glissement (Zone critique du cercle de glissement)
- *Analyse* physiques de la partie glissante du talus amont et aval du barrage
- *Examiner* l'équilibre d'un talus de barrage par la méthode de Fellenius et bishop.
- *Vérification* de la stabilité du barrage en définissant le coefficient de sécurité F_s dans les différents cas.

2. Pre-requis

Pré-requis :

L'apprenant doit savoir au-préalable les connaissances suivantes :

- Généralités sur les barrages en terres (Classification des barrages en terre Dimensionnement géométrique des murs de barrages en terre)
- Les infiltrations dans les murs des barrages en terre.
- Connaissances sur la mécanique de sol basées sur l'équilibre limite

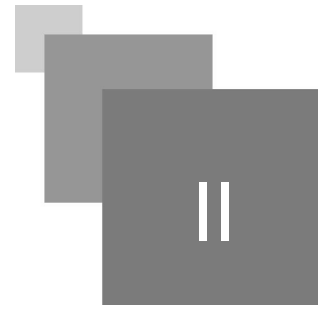
3. Introduction

La stabilité des talus aux glissements pour toute sollicitation pouvant survenir. La détermination des conditions de stabilité fait appel aux méthodes de mécanique des sols basées sur l'étude de l'équilibre limite. La stabilité des pentes peut être augmentée en choisissant des matériaux plus performants qui permettent d'éviter la rupture des talus mais aussi assurer la stabilité de la fondation et éviter les

déformations excessives.

En général, on se donne des pentes qui paraissent optimales, compte tenu de la nature des matériaux, et on vérifie par une étude de stabilité que le barrage présente une sécurité suffisante avec ces pentes.

Stabilité des barrages en terre



| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Facteur de sécurité | 6 |
| Etude de stabilité des talus : | 7 |
| Etude de l'équilibre d'un talus de barrage par la méthode de Fellenius | 9 |
| Conditions d'analyse | 12 |
| Détermination des cercles de glissement : | 14 |

Le savant « Piolier » En 1691, a donné la première idée sur la surface de glissement avec un angle d'inclinaison normal.

« Coulomb » s'est basé sur cette idée pour calculer la pression du sol agissant sur le mur de soutènement, d'où il a exposé son expression universelle en 1773 sous la forme suivante :

Le savant « Francier » En 1820 a utilisé la première fois le principe de « Coulomb » dans l'étude de la stabilité des talus d'où il a abouti à des tableaux permettant la définition de la hauteur limite des talus homogènes, par la suite en 1857 « Rankine » a exposé l'idée d'estimer l'équilibre des talus en se basant sur l'étude de l'état des contraintes des matériaux constituant le terrain.

Le savant « Colire » En 1903a essayé de fonder une théorie d'équilibre limite dans les terrains meubles et disloqués et a abouti à l'établissement de l'équation d'équilibre limite, la résolution du problème n'a pas été faite de la manière qui permet une application pratique, par ailleurs pour la première fois « Petterson et Colire » ont introduit en 1916 le principe des surfaces de glissement dans le calcul de la stabilité des talus, ce principe a été approuvé par la commission suédoise entre 1913 et 1920, développé pour les ruptures circulaires par « Fellenius » en 1927, perfectionné par « Bishop » en faisant introduire la pression de l'eau dans le sol en 1954 et généralisé pour les ruptures non circulaires par « Nonveiller » en 1965.

Depuis un certain temps, les méthodes numériques sont un complément utile voire nécessaire aux méthodes d'équilibre limite pour l'analyse de la stabilité des ouvrages en terre. Le couplage entre ces deux méthodes ne cesse d'évoluer. Dans ce chapitre nous présenterons les différentes méthodes d'analyse de stabilité des talus ainsi que des notions et connaissances relatives à la stabilité.

La stabilité d'un barrage en remblai réside dans la stabilité aux glissements de ses talus pour toute sollicitation pouvant survenir. La détermination des conditions de stabilité fait appel aux méthodes de

mécanique des sols basées sur l'étude de l'équilibre limite. La stabilité des pentes peut être augmentée en choisissant des matériaux plus performants qui permettent d'éviter la rupture des talus mais aussi assurer la stabilité de la fondation et éviter les déformations excessives.

En général, on se donne des pentes qui paraissent optimales, compte tenu de la nature des matériaux, et on vérifie par une étude de stabilité que le barrage présente une sécurité suffisante avec ces pentes.

1. Facteur de sécurité

Le coefficient de sécurité est utilisé dans les calculs à la rupture. Il permet d'apprécier la marge de sécurité vis-à-vis de la rupture .Il existe plusieurs définitions possibles du coefficient de sécurité, chacune présente des avantages et des inconvénients. Pour évaluer la stabilité d'une pente, l'ingénieur doit choisir entre plusieurs définitions du coefficient de sécurité, ce coefficient peut être un rapport de forces, de moments, de grandeurs par rapport à une grandeur limite. Nous citons ci-dessous un certain nombre de ces définitions :

$$1/- F = \frac{\tau_{max}}{\tau} = \frac{\text{résistance au cisaillement maximal mobilisable}}{\text{résistance au cisaillement nécessaire à l'équilibre}} \quad (\text{Définition de Bishop})$$

Il faut noter qu'avec cette définition la valeur du coefficient de sécurité est une valeur ponctuel qui va donc dépendre de la position du point M considéré le long de la surface testée.

$$2- F = \frac{\text{effort résistant}}{\text{effort moteur}}$$

Cette définition suppose que la surface testée est plane.

$$3- F = \frac{\text{moment résistant}}{\text{moment moteur}} \quad (\text{Définition de Fröhlich})$$

Cette définition suppose que la surface testée est circulaire (ellipsoïdale en 3D).

$$4- F = \frac{H_c}{H} = \frac{\text{hauteur critique}}{\text{hauteur réelle}}$$

Il existe de nombreuses méthodes pour le calcul de la stabilité des talus. Elles sont décrites dans la bibliographie spécialisée. Certaines se prêtent au calcul manuel, d'autres nécessitent l'utilisation d'outils informatiques.

D'une manière générale, ces méthodes se basent toutes sur le même principe, elles cherchent à déterminer des endroits dans le massif où les forces qui provoquent le glissement risquent de dépasser les forces qui résistent. La sécurité est assurée si, dans aucun endroit, les premières forces ne dépasseront pas les secondes. La marge de sécurité est exprimée par le rapport des forces de résistances sur les forces motrices.

Ce coefficient de sécurité est défini par des rapports de forces, de contraintes, de moments ou même en termes de hauteurs de talus.

2. Etude de stabilité des talus :

Les problèmes de stabilité des talus sont systématiquement posés en conditions de déformation plane qui cause le glissement (rupture par déplacement en bloc d'une partie du massif), on distingue trois grandes catégories de glissements :

- Cercle de pente (ou de flanc de talus)

- Cercle de pied de talus
- Cercle profond (de rupture profond).

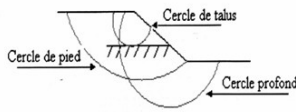


Figure 01 Différent type de rupture circulaire

La stabilité d'un talus dépend de la relation entre :

- Les moments moteurs dont le terme principal est le poids du massif.
- Les moments résistants dus essentiellement à la résistance au cisaillement le long de ligne de rupture.

Les risques d'instabilité seront donc dus :

- Soit à une augmentation des moments moteurs (surcharge au sommet d'un talus, modification de la géométrie de talus, action hydrodynamique dus à l'écoulement d'eau)
- Soit à une diminution des moments résistant (suppression de masse en pied de talus, diminution des caractéristiques mécaniques du massif du fait d'infiltration d'eau important).

La stabilité des talus concerne aussi bien des pentes naturelles que les talus artificiels tel que les barrages, les remblais Etc.

L'étude de la stabilité des talus consiste à évaluer le rapport des forces résistantes aux forces motrices. Cette étude nécessite la connaissance des conditions géologique, hydrologique et topographique du terrain ainsi que les propriétés physique et mécanique du sol.

Les méthodes de calculs, dites de rupture, sont basées sur des constatations expérimentales. Quand un glissement se produit, il y a une masse de terre qui se détache du reste du massif suivant une surface de rupture, donc le problème est comment assurer la stabilité de la partie « a » par rapport à la partie « b »

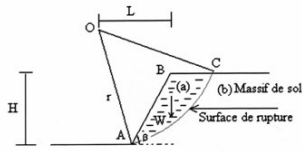


Figure 02. : Stabilité d'un talus Généralement

On admet hypothèses suivantes :

- On considère que le problème est bidimensionnel.
- On suppose que le massif se comporte comme un matériau rigide.
- La rupture se produit simultanément dans tous les points de la ligne de glissement.
- La mise en état de plasticité ne concerne que la ligne de glissement le reste du massif est en équilibre limite

L'expérience a montré que s'il n'y pas d'erreur grossier sue les hypothèses de calcule et les propriétés du sol :

- Les talus seront toujours stables si le coefficient de sécurité : $F_s > F_{adm}$
- Le glissement était pratiquement inévitable si : $F_s < F_{adm}$

3. Etude de l'équilibre d'un talus de barrage par la méthode de Fellenius

Le principe de base de cette méthode consiste à découper le volume du sol étudié en un certain nombre de tranches juxtaposées (Figures 03), d'appliquer les différentes forces sur ces tranches et d'étudier l'équilibre de l'ensemble. Les hypothèses de calcul sont (Le Delliou 2003):

- La rupture se fait dans un plan (analyse bidimensionnelle) ;
- La rupture se fait selon une courbe dans l'allure est connue et circulaire ;
- Les forces extérieures d'entraînement sont le poids du sol et les surcharges ;
- Le problème est statique ;
- Les lois de la mécanique des milieux continus s'appliquent au sol ;
- le comportement du sol est régit par la loi de Coulomb ;
- Le coefficient de sécurité « FS » est constant le long de la courbe de rupture.

On trace sur une coupe transversale du barrage plusieurs cercles de glissement et on cherche le cercle critique, c'est-à-dire celui qui présente le coefficient de sécurité le plus faible, en appliquant la méthode qui va suivre :

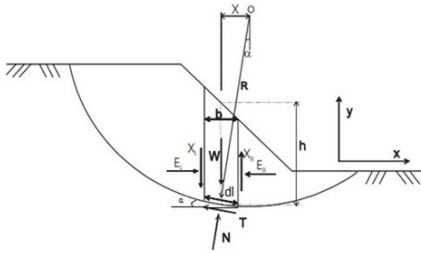


Figure 03: Découpage en tranche

Pour chaque tranche verticale (i), on détermine les efforts suivants :

pois total W_i de la tranche de largeur b et de hauteur h ;

La composante normale du poids sur la surface de glissement est $W_i \cos i$;

La composante tangentielle du poids est $W_i \sin i$;

La résultante des forces de pression sur la base de la tranche.

On note :

X, E = composantes verticale et horizontale des forces inter tranches ; b : épaisseur de la tranche ;

α : angle que fait la base de la tranche avec l'horizontale ; R : rayon du cercle de rupture de centre O ;

dl : longueur du plan de glissement de la tranche ; x : bras de levier du poids des terres.

Sachant que $T = \tau \cdot dl$ et τ est donnée par l'équation de Mohr- Coulomb:

$$\tau = C + (\sigma - u) \tan \varphi$$

Avec:

C : est la cohésion du sol, elle s'exprime en unité de contrainte ;

σ est la contrainte normale ;

u est la pression interstitielle.

φ est l'angle de frottement interne

Finalement, sur la tranche (i) :

La force motrice est la composante tangentielle du poids, elle est égale à $W_i \sin \alpha_i$

La force résistante est la force de frottement au niveau du plan de glissement de la tranche, elle est égale $C \cdot dl + (W_i \cos \alpha_i - u \cdot dl) \tan \varphi$

La largeur de la tranche dl peut s'exprimer par (voir figure 01)

$$dl = b / \cos \alpha_i$$

En négligeant les forces entre les tranches verticales et horizontales, le facteur de sécurité est défini comme étant le rapport du moment résistant sur le moment moteur. Pour un cercle de glissement donné qui découpe le volume de sol en n tranches, il vaut :

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (C \cdot dl + (W_i \cos \alpha_i - u \cdot dl) \tan \varphi)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (a)$$

3.1. - Prise en compte de la sismicité dans le calcul de stabilité

Prendre cet aspect en compte est très important en zone sismique (plusieurs ouvrages à travers le monde ont cédés suite à des tremblements de terre). Les méthodes employées pour apprécier la stabilité des ouvrages en séisme sont pseudo-statique ou dynamiques. Pour les petits ouvrages et un séisme faible ou modéré, on se contente généralement d'utiliser la méthode pseudo-statique. Lorsque l'ouvrage est plus sensible et le séisme plus important, il est recommandé d'utiliser des méthodes plus représentatives prenant en compte le comportement dynamique des sols.

Méthode pseudo-statique

C'est la méthode la plus généralement utilisée dans le cas des petits et moyens barrages. L'effet du séisme est exprimé par une force horizontale équivalente. La magnitude de cette force est considérée comme une fraction du poids de l'ouvrage (Figure).

Dans le cas de l'application de la méthode des tranches de Fellenius, la force sismique P_s est calculée pour chaque tranche. Elle s'exprime sous la forme (Rolley, Kreitmann et al. 1977):

$$\text{Où } P_s = \beta \cdot K \cdot w$$

β est un coefficient qui dépend des caractéristiques dynamiques de l'ouvrage au séisme ($\beta = 1,5$)

K : est un coefficient qui dépend du degré de sismicité de la zone et du degré d'importance de l'ouvrage ($k \approx 0,025$)

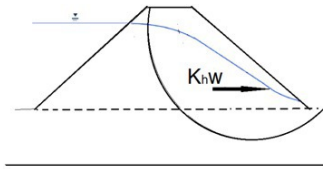


Figure 04: Sollicitation pseudo-statique

L'équation (a) devient :

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (C \cdot dl + (W_i \cos \alpha_i - u \cdot dl) \tan \varphi)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \beta \frac{K}{R} \sum_{i=1}^n W_i q_i}$$

Avec :

q : le bras de levier de la force sismique par rapport au centre du cercle O et de rayon R

4. Conditions d'analyse

La stabilité des talus d'un barrage en remblai doit être vérifiée aux différentes phases de la construction et de la vie de l'ouvrage. On distingue généralement trois classes de conditions pour lesquelles la stabilité d'un barrage en remblai doit être vérifiée.

i. Fin de construction.

L'analyse de la stabilité pour cette condition sert à vérifier que le barrage peut être construit jusqu'à sa hauteur finale sans rupture. Il n'y a pas encore d'action de la retenue, mais les pressions interstitielles sont élevées car les surpressions dues à la construction ne se sont pas encore dissipées. La résistance est fonction de la contrainte effective σ' et elle devient de plus en plus faible avec l'augmentation de la pression interstitielle u ($\sigma' = \sigma - u$). Dans ce cas, il peut se produire un glissement du talus à cause de la diminution de la résistance au cisaillement. Il est recommandé d'analyser le talus

en aval.

ii. Période d'exploitation

L'analyse de la stabilité sert dans ce cas à vérifier que le barrage est stable après remplissage du réservoir et une fois que le réseau d'écoulement s'est établi à travers le barrage.

Dans le secteur amont du barrage, la contrainte effective (et donc la résistance) est réduite à cause de la pression interstitielle. Cette diminution de la stabilité, associée à la réduction de σ' est cependant compensée par la pression du réservoir qui tend à s'opposer au glissement du talus amont.

Dans le secteur aval du barrage, en raison de l'écoulement dans le massif une surface de suintement peut apparaître sur ce talus. La poussée d'écoulement qui s'exerce sur les grains solides a tendance à le déstabiliser, un drainage du talus aval est généralement prévu. Lorsque la retenue est pleine, l'écoulement est donc défavorable à la stabilité du talus aval. Les caractéristiques mécaniques du sol C et Φ , quelque soit la condition de perméabilité du matériau de construction, peuvent être obtenus à partir de l'essai de résistance au cisaillement à long terme, surconsolidé, saturé et drainé.

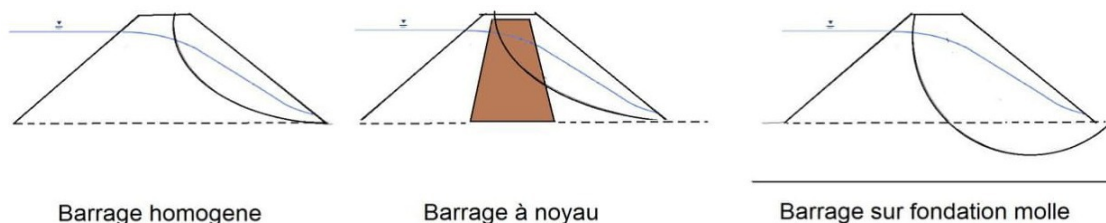


Figure 05: Surface de rupture les plus critiques en fonction du type de barrage en terre

iii. Vidange rapide.

La condition 'vidange rapide' est rencontrée lorsque le niveau d'eau diminue brusquement au-dessous du niveau normal de la retenue (Figure 31). Dans ce cas les pressions d'eau dans le corps de l'ouvrage ne sont pas dissipées, alors que la pression d'eau extérieure a disparu. Le talus amont se trouve dans une situation plus défavorable qu'en condition normale d'exploitation. C'est donc ce secteur amont du barrage qui est affecté par la condition 'vidange rapide', on conserve la pression et on enlève l'effet stabilisateur du réservoir.

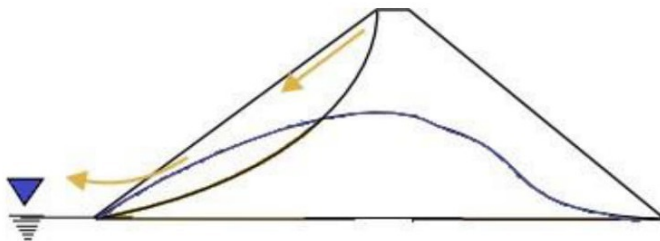


Figure 06: Glissement du parement amont sous l'effet de vidange rapide

Remarque : Facteurs de sécurité minimaux

Selon les normes DIN (Le Delliou 2003) les facteurs de sécurité minimaux utilisés dans les barrages en terre sont dans les:

- Conditions normaux (lac plein à niveau normal) $FS \geq 1.4$
- Conditions spéciales sans séisme (lac plein à niveau exceptionnelles, vidange rapide) $FS \geq 1.3$
- Conditions exceptionnelles avec séisme (lac plein à niveau normal, vidange rapide, lac vide) $FS \geq 1.2$

5. Détermination des cercles de glissement :

Cette méthode nous mène à respecter les étapes suivantes :

- Construire à l'échelle le profil en travers du barrage.
- Tracer deux lignes au milieu du talus la première est verticale et la deuxième inclinée de 85° par rapport au talus considéré.
- Détermination de la zone du centre du cercle critique, pour cela Fondeev recommande de disposer le centre du cercle de glissement dans les limites définies par deux cercles de rayons R_{min} et R_{max} donné par le tableau suivant :

| Pentes des talus | 1/1 | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| R_{\min}/H_b | 0.75 | 0.75 | 1.00 | 1.50 | 2.20 | 3.00 |
| R_{\max}/H_b | 1.50 | 1.75 | 2.30 | 3.75 | 4.80 | 5.50 |

Tab : - Détermination des rayons max et min en fonction des pentes des talus.

H_b : hauteur du barrage en (m)

- Indiquer le centre « o » et tracer un cercle de glissement.
- Découper la zone de glissement en tranches verticales d'épaisseur « $b = 0,1R$ » juxtaposées et on étudie l'équilibre de l'ensemble, a la limite de glissement le long du cercle.

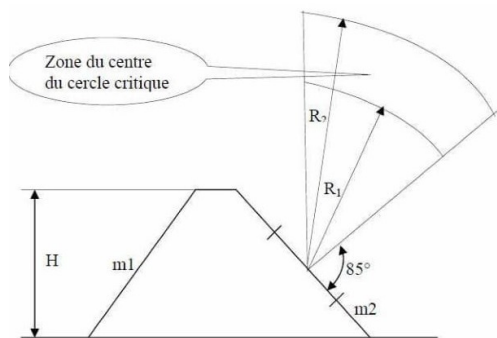


Figure 07 : Zone du centre du cercle critique

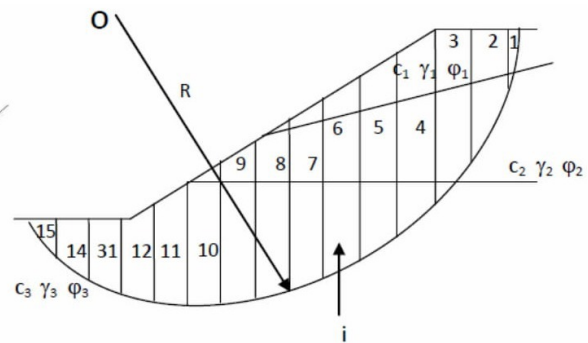


Figure .08: Découpage du talus en tranches

Les paramètres géotechniques utilisés pour le calcul :

Tab : - Caractéristiques géotechnique des sols.

| Paramètre | Unités | Noyau | Recharge | Fondation |
|-----------------------|-------------------|-------|----------|-----------|
| φ | Degré | 19 | 19 | 17 |
| C | T /m ² | 2.0 | 2.0 | 3.0 |
| γ_{sat} | T /m ³ | 2.46 | 2.50 | 2.26 |
| γ_d | T /m ³ | 1.86 | 1.85 | 1.91 |

Application



Soit un barrage en terre constitué d'un massif homogène de perméabilité isotrope k reposant sur un substratum horizontal imperméable (Figure 32). En utilisant la méthode des tranches de Fellenius :

1. Calculer manuellement le coefficient de sécurité le long de la ligne de rupture de rayon $R=32$ m et de centre de rupture $O (20 ; 32)$ du talus aval du barrage en terre, en fin de construction et après dissipation des surpressions ($u=0$)

Données : $H=20$ m, $h=17$ m, $m_1=m_2=1/2.5$, $b_c=7.5$ m, Les propriétés du sol sont :

C (cohésion) = 20 kpa Φ (angle de frottement interne) = 30°

- (Poids volumique) = 18kN/m³

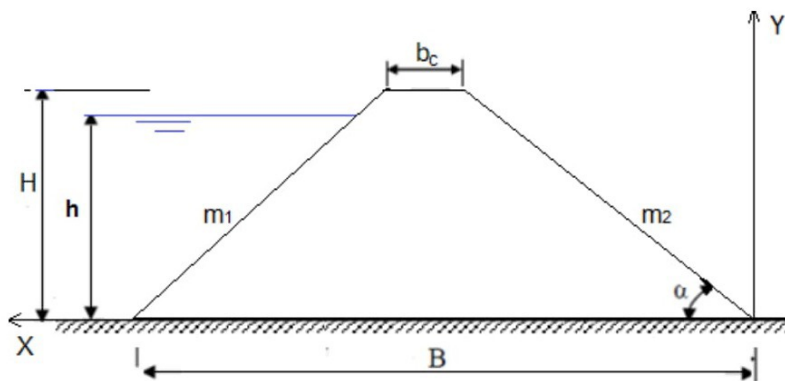


Figure 09: Barrage en terre homogène reposant sur un substratum imperméable

Solution

IV

Le volume de sol intercepté par le cercle de rupture est découpé en 10 tranches de largeur égale (Figure 06). Les résultats du calcul des forces appliquées sur les différentes tranches sont présentés dans le tableau 7.

| Tranche | W (kN) | α (°) | Wcos α (kN) | Wsin α (kN) | dl (m) | $C \cdot dl +$ $(W_i \cos \alpha_i \tan \varphi)$ (kN) |
|----------|-----------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------|--------------------------------------------------------------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |
| Σ | | | | | | |

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (C \cdot dl + (W_i \cos \alpha_i - u \cdot dl) \tan \varphi)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$