

Écrans de soutènement

Cercle de gilssement



Software pour
l'Architecture et
l'Ingénierie de
la **Construction**

CYPE Ingenieros, S.A.
Avda. Eusebio Sempere, 5
03003 Alicante
Tel. (+34) 965 92 25 50
Fax (+34) 965 12 49 50
cype@cype.com

www.cype.fr

IMPORTANT : CE TEXTE REQUIERT VOTRE ATTENTION

L'information contenue dans ce document est la propriété de CYPE Ingenieros, S.A. La reproduction partielle ou totale ainsi que la diffusion sous quelque forme que ce soit est interdite sans l'autorisation expresse et préalable de CYPE Ingenieros, S.A. L'infraction des droits de propriété intellectuelle est un délit (Art. L.122-4 du Code de la Propriété Intellectuelle).

Ce document et l'information qu'il contient sont partie intégrante et indissociable de la documentation qui accompagne la Licence d'Utilisation des programmes informatiques de CYPE Ingenieros, S.A. Par conséquent, elle est soumise aux mêmes devoirs et conditions. Vous devrez lire, comprendre et accepter le Contrat de Licence d'Utilisation du software associé à cette documentation avant toute utilisation d'un des composants du produit. Si vous N'ACCEPTÉZ PAS les termes du Contrat de Licence d'utilisation, rendez immédiatement le software et tous les éléments qui l'accompagnent au lieu d'achat afin d'en obtenir le remboursement intégral.

Ce manuel correspond à la version du software dénommée ECRANS DE SOUTENEMENT par CYPE Ingenieros, S.A. L'information contenue dans ce document décrit substantiellement les caractéristiques et méthodes d'utilisation du ou des programmes qu'elle accompagne.

L'information contenue dans ce document peut avoir été modifiée postérieurement à l'édition mécanique de ce livre sans avis préalable. Le software associé à ce document peut être soumis à des modifications sans avis préalable.

CYPE Ingenieros, S.A. dispose d'autres services parmi lesquels vous trouverez les Mises à Jour, grâce auxquelles vous pourrez acquérir les dernières versions du software et la documentation qui les accompagne. Si vous avez des doutes sur les présentes conditions, par rapport au Contrat de Licence d'Utilisation du software, ou si vous souhaitez simplement rentrer en contact avec CYPE Ingenieros, S.A., adressez-vous à votre Distributeur Local Autorisé ou au Service Après-Vente de CYPE Ingenieros, S.A. à l'adresse suivante :

Avda. Eusebio Sempere, 5 · 03003 Alicante (Espagne) · Tel: +34 965 92 25 50 · Fax: +34 965 12 49 50 · www.cype.com

© CYPE Ingenieros, S.A.

2ème Edition (février, 2007)

Edité et Imprimé à Alicante (Espagne)

Windows ® est une marque enregistrée de Microsoft Corporation ®.

Table des matières

Introduction	5		
1. Introduction	7	4. Exemple n° 1.	
1.1. Phénomène de stabilité globale	7	Murs de soutènement en béton armé	15
1.2. Calcul du coefficient de sécurité relatif au glissement circulaire	8	4.1. Cercle de glissement le plus défavorable d'un mur de soutènement en console	15
1.3. Méthodes de calcul	8	4.1.1. Données du problème	15
1.4. Méthode des tranches (Méthode simplifiée de Bishop)	9	4.1.2. Résultats du programme	15
		4.1.3. Calculs de comparaison avec les résultats du programme	16
2. Considérations et méthodes de calcul	10	5. Exemple n° 2.	
2.1. Hypothèses de calcul	10	Ecrans de soutènement	18
2.2. Adéquation de la méthode des tranches (Méthode simplifiée de Bishop)	11	5.1. Cercle de glissement le plus défavorable en une phase quelconque de réalisation d'un écran ..	18
2.3. Processus de calcul	12	5.1.1. Données du problème	18
3. Bibliographie de référence	14	5.1.2. Résultats du programme	18
		5.1.3. Calculs de comparaison avec les résultats du programme	19

La réalisation d'écrans de soutènement constitue une solution de plus en plus utilisée. Ceci est dû, entre autres, au développement des méthodes de calcul qui permettent de prédire le comportement structural prenant en compte le processus de construction et les interactions entre les différents éléments (mur, éléments d'appui et terrain).

Les méthodes de calcul les plus usuelles sont celles basées sur les éléments finis et celles reposant sur le coefficient de réaction. Le présent document présente le programme, détaille l'effet de l'interaction écran terrain, les considérations additionnelles dues aux actions introduites par les éléments d'appui (ancrages, butons ou planchers) ainsi que l'influence du procédé de construction et se centre sur le modèle de calcul pour les méthodes basées sur le coefficient de réaction.

1. Introduction

1.1. Phénomène de stabilité globale

Le dénivellement engendré par les éléments de soutènement entraîne une tendance du terrain à se remettre à niveau. Ainsi la masse du terrain induit la possibilité d'un problème d'instabilité globale auquel s'oppose la résistance au cisaillement.

Ces types d'instabilité peuvent être classés en deux groupes: les éboulements (la masse instable tombe) et les glissements (la masse instable se déplace) dont un cas typique est le glissement d'une masse du sol par rapport à une autre lorsque la résistance au cisaillement est dépassée tout le long de la zone les séparant. Ces déplacements peuvent être plans, circulaires, quelconques ou être une combinaison de ces derniers.

Ainsi, la sécurité vis à vis de ces phénomènes d'instabilité globale doit être vérifiée dans toute la structure.

En pratique, on étudie généralement les surfaces circulaires, pour lesquelles il convient de déterminer le cercle qui nécessite la plus grande résistance du terrain ou, ce qui revient au même, qui présente le plus petit coefficient de sécurité face au glissement circulaire, ce coefficient étant la relation entre la résistance au cisaillement du terrain en rupture et la résistance au cisaillement qu'il doit générer.

Les forces tendant à déstabiliser une masse de sol déterminée sont principalement son poids propre, celui de l'élément de contention, les surcharges contenues dans le cercle, l'excitation sismique et toute autre action externe déstabilisatrice.

Pour déterminer le cercle de glissement le plus défavorable, toutes les données du problème doivent être connues,

à savoir: le dénivellement (talus), les caractéristiques de l'élément de contention, la stratigraphie, l'ensemble des charges sur le système élément de contention - terrain et pour finir le choix d'une méthode dont la formule est compatible avec le problème en question.

Les figures suivantes schématisent le problème de stabilité globale traité ici.

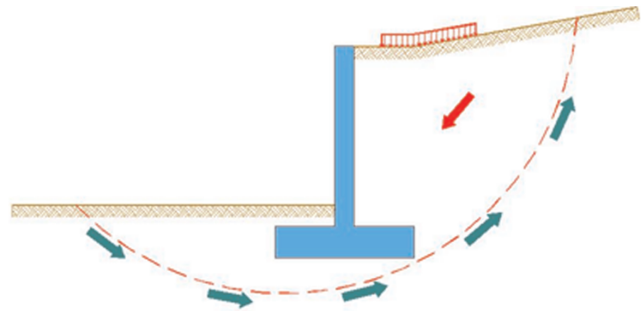


Fig. 1.1

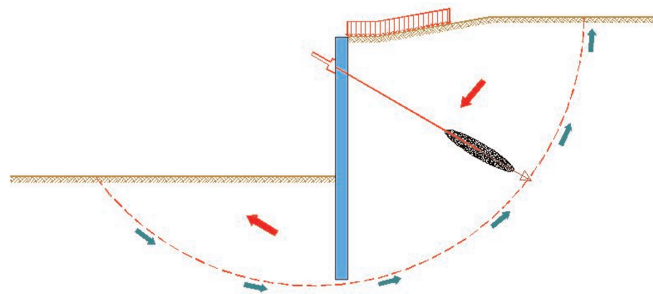


Fig. 1.2

1.2. Calcul du coefficient de sécurité relatif au glissement circulaire

Comme il a été dit précédemment, le coefficient de sécurité relatif à la tenue d'une masse de sol potentiellement instable face à un phénomène de glissement circulaire, peut être évalué comme la relation entre les actions stabilisatrices et les actions déstabilisatrices.

Quantitativement, il peut s'exprimer, en termes de moments, comme:

$$F = \frac{\sum MR}{\sum MM}$$

où:

$\sum MR$: somme des moments produits par les actions **résistantes** exprimés par rapport au centre du cercle étudié.

$\sum MM$: somme des moments produits par les actions **motrices** exprimés par rapport au centre du cercle étudié.

Ce coefficient de sécurité peut être associé à différents paramètres, tels que la résistance du terrain, la valeur des surcharges, l'excitation sismique, etc., selon les valeurs de ces paramètres employées dans la formule. C'est-à-dire que le coefficient de sécurité obtenu évalue la résistance au cisaillement exigée par le terrain, ou l'excès de charge pouvant agir sur le terrain, ou l'excitation sismique maximale acceptée par le système, etc.

1.3. Méthodes de calcul

Actuellement, il existe plusieurs méthodes pour calculer le coefficient de sécurité d'une masse potentiellement instable face à des phénomènes de glissement circulaires. En général, ces méthodes consistent à proposer une surface de glissement et à étudier son équilibre, en fonction des actions appliquées. Cette étude divise la masse du terrain glissant en petites parties de formes géométriques qui per-

mettent un calcul simple des actions auxquelles elles sont soumises.

Une fois les actions agissant sur la masse de terrain considérée déterminées, sont établies, en se basant sur une série d'hypothèses, les équations d'équilibre correspondantes desquelles est déduit, via un calcul plus ou moins complexe selon la méthode utilisée, la valeur du coefficient de sécurité du cercle étudié.

Le processus est répété successivement pour un nombre significatif de cercles possibles de glissement, en faisant varier leur rayon et leur position dans l'espace. Chacun d'eux met en évidence un coefficient de sécurité dont le plus petit correspond au coefficient de sécurité du système.

Pour le tracé de tous ces cercles, on utilise généralement comme base une maille orthogonale X-Y où chaque point correspond aux centres des cercles possibles de glissement de rayons croissants. La figure 1.3 montre un cercle générique de rayon "R" dont le centre est le point "O" de la maille orthogonale.

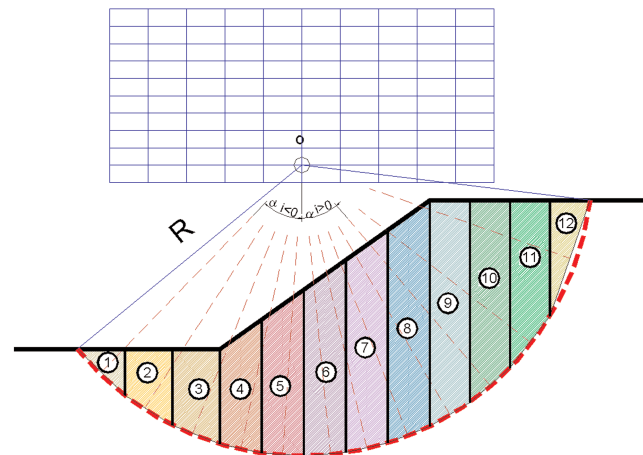


Fig. 1.3

1.4. Méthode des tranches (Méthode simplifiée de Bishop)

Cette méthode consiste à analyser l'équilibre d'une masse de terrain suivant une surface de glissement circulaire. Pour cela, on trace un cercle sur la section transversale du terrain et on divise en tranches la masse glissante contenue dans ce cercle.

En se basant sur le schéma isolé de chaque tranche générique "i" comme il est montré sur la figure 1.4, on expose la formule mathématique de la méthode.

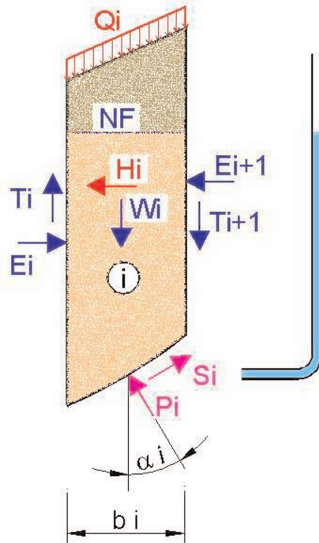


Fig. 1.4

Pour un talus déterminé, l'équation utilisée pour obtenir le coefficient de sécurité "F" d'un cercle quelconque de rayon R (ayant ou non des surcharges "Q") est la suivante¹:

¹ Pour obtenir la formule et ses hypothèses, il est recommandé de consulter les références bibliographiques I et IV indiquées par la suite.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{c_i \cdot b_i + (W_i + Q_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \phi_i}{m \alpha_i} \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad [1]$$

où

$$m \alpha_i = \cos \alpha_i \cdot \left(1 + \frac{\tan \phi_i \cdot \tan \alpha_i}{F} \right) \quad [2]$$

b_i : largeur de la tranche "i".

c_i : valeur de la cohésion du terrain au point milieu de la base de la tranche "i".

$\tan \phi_i$: valeur de la tangente de l'angle de rotation interne du terrain au point milieu de la base de la tranche "i".

α_i : valeur de l'angle formé par la droite unissant le centre du cercle avec le point milieu de la base de la tranche "i" et la verticale.

W_i : somme des poids de toutes les couches de terrain présentes au dessus du point milieu de la base de la tranche "i".

Q_i : résultante de la pression produite par les surcharges agissant dans le terrain au dessus du point milieu de la base de la tranche "i".

u_i : valeur de la surpression des pores au point milieu de la base de la tranche "i".

Il est supposé que les forces entre tranches sont nulles, c'est-à-dire $\{\Delta T_i\} = 0$ et $\{\Delta E_i\} = 0$.

L'équation précédente, qui est de type implicite en F, se résout par itérations successives, en partant d'une valeur initiale $F = F_1$ qui est introduite dans l'équation [2] et est comparée avec la valeur F_2 obtenue à partir de l'équation [1]. Si les valeurs F_1 et F_2 ne sont pas suffisamment proches, une nouvelle itération est lancée à partir de la valeur F_2 de l'équation [2] et ainsi de suite jusqu'à la convergence vers une valeur finale du coefficient de sécurité F.

2. Considérations et méthodes de calcul

2.1. Hypothèses de calcul

Comme pour toute analyse, il est nécessaire de définir préalablement les hypothèses ou suppositions sur lesquelles se fonde cette dernière. Pour cela, et afin de prendre en compte des situations particulières telles que la présence d'un élément de soutènement, d'une nappe phréatique, de charges en couronnement, etc., sont résumées par la suite, les hypothèses considérées pour le calcul du cercle de glissement le plus défavorable.

- La méthode employée pour le calcul du coefficient de sécurité le plus défavorable est la Méthode des tranches, également appelée Méthode simplifiée de Bishop, dans laquelle il est supposé que les forces entre tranches sont nulles, c'est-à-dire que $\{\Delta T_i\} = 0$ et $\{\Delta E_i\} = 0$. Pour connaître les limites et la validité de cette méthode, il est recommandé de consulter la bibliographie de référence.
- Le sol est homogène et il n'existe pas de prédominance de blocs dans la composition de celui-ci.
- On considère que la résistance au cisaillement du terrain est celle de l'équation de Mohr-Coulomb, c'est-à-dire: $\tau = c + (\sigma - \mu) \tan \phi$.
- On considère un état de déformation plan afin d'étudier une unité de largeur du système.
- La masse instable suit une surface potentielle de glissement de directrice circulaire.
- Ne sont pas considérés les phénomènes d'éboulement ou d'effondrement, de liquéfaction, l'existence d'irrégularités telles que les diaclases, l'érosion par les fluides, les creusements par les courants naturels, etc.
- Les couches sont considérées parfaitement horizontales sur toute leur extension et la couche la plus profonde est considérée comme semi infinie en profondeur.
- La densité d'une couche est apparente ou saturée selon que cette couche se trouve au dessus ou en dessous du niveau phréatique.
- Sont analysés les cercles profonds pénétrant dans le terrain à l'exception de ceux qui pénètrent dans une couche rocheuse.
- Les cercles ne coupant aucune couche ne sont pas considérés.
- Les contraintes de capillarité de la masse du sol ne sont pas considérées.
- La nappe phréatique est considérée en équilibre horizontal.
- Dans le cas d'écrans de soutènement, ne sont pas considérées les actions des ancrages et des butons engendrées sur l'écran, c'est-à-dire que l'équilibre est analysé sans la contribution de ces éléments. Si le coefficient obtenu sous cette hypothèse extrême est satisfaisant, cela signifie que la contribution des éléments d'appui n'est pas, en toute rigueur, nécessaire. Dans le cas où le coefficient obtenu n'est pas satisfaisant, il est nécessaire de considérer ces éléments, qui doivent être conçus pour résister aux actions afin de vérifier l'équilibre global. D'autre part, ne sont pas analysés les coefficients de sécurité dans les phases où apparaissent des planchers étant donné qu'il est considéré que l'exécution du bâtiment ne permet pas le développement d'un cercle de glissement.

- Dans le cas des écrans génériques, les cercles les traversant ne sont pas pris en compte et leur poids spécifique est considéré comme nul.
- Sont prises en compte les actions en couronnement développant des moments par rapport au centre du cercle de glissement analysé.
- Le coefficient sismique horizontal (fraction de l'accélération de la gravité) est considéré uniforme en altitude.
- On assume que les surcharges sur le terrain se diffusent en profondeur avec un angle de 30 degrés par rapport à la verticale.
- On considère que la résistance de l'élément de soutènement dans la surface de cisaillement avec un cercle de glissement quelconque, est soit la résistance caractéristique du matériau au cisaillement, spécifiée par la norme, soit la résistance caractéristique de traction dans le cas où la valeur de cette résistance caractéristique au cisaillement n'est pas spécifiée. Pour les éléments en béton, on considère les résistances correspondantes au cas de béton en masse.
- Ne sont pas considérées les contraintes du terrain produites par l'élément de soutènement et ses charges en couronnement, sur la surface de glissement étudiée. Cette situation est en général conservée afin d'obtenir pour le coefficient de sécurité une valeur inférieure à celle qui serait obtenue en considérant ces pressions. En général, sauf pour les charges de valeurs importantes appliquées sur cet élément, la différence entre les valeurs des coefficients sera minime.
- Pour les combinaisons avec séisme, une analyse statique est réalisée et sont considérées les actions horizontales produites par les masses du système terrain - nappe phréatique - élément de soutènement, multipliées par la valeur de l'accélération sismique définie par l'utilisateur et les vecteurs des charges en couronnement correspondant à la combinaison avec séisme.

Le fait que l'accélération sismique affecte les surcharges définies n'est pas pris en compte.

2.2. Adéquation de la méthode des tranches (Méthode simplifiée de Bishop)

La méthode décrite plus haut a été adaptée à des conditions plus variées et complexes présentées dans l'étude du cercle de glissement le plus défavorable des structures de soutènement. Le critère de la référence bibliographique II traite de cela.

Il en résulte que l'équation [1] devient l'équation [3] suivante:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{c_i \cdot b_i + (W_i + Wh_i + Q_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \phi_i}{m \alpha_i} \right] + \frac{M_{\tau M}}{R} + \frac{\sum_m MR_m}{R}}{\sum_{i=1}^n [(W_i + Wh_i) \cdot \sin \alpha_i] + \frac{\sum_k MM_k}{R}} \quad [3]$$

où

$$m \alpha_i = \cos \alpha_i \cdot \left(1 + \frac{\tan \phi_i \cdot \tan \alpha_i}{F} \right) \quad [4]$$

Dans l'équilibre de la masse motrice (déstabilisante), seules sont considérées les tranches vérifiant l'inéquation suivante:

$$\left(1 + \frac{\tan \phi_i \cdot \tan \alpha_i}{F} \right) \geq 0,10 \quad [5]$$

b_i : largeur de la bande "i" (la valeur prise est le minimum entre $R/10$ et 1,00 m).

c_i : valeur de la cohésion du terrain au point milieu de la base de la tranche "i".

$\tan \phi_i$: valeur de la tangente de l'angle de rotation interne du terrain au point milieu de la base de la tranche "i".

α_i : valeur de l'angle formé par la droite unissant le centre du cercle avec le point milieu de la base de la tranche "i" et la verticale.

W_i : somme des poids de toutes les couches de terrain présentes au dessus du point milieu de la base de la tranche "i". On considère les densités apparentes ou saturées du terrain selon qu'elles se situent au dessus ou en dessous du niveau phréatique.

W_{hi} : poids de l'eau présente au dessus de la surface de la tranche "i" s'il existe un niveau phréatique.

Q_i : résultante de la pression produite par les surcharges agissant dans le terrain au dessus du point milieu de la base de la tranche "i".

u_i^s : valeur de la surpression des pores au point milieu de la base de la tranche "i".

$M\tau_M$: moment produit par la résistance au cisaillement de l'élément de soutènement par rapport au centre du cercle, lorsque celui-ci le traverse.

ΣMM_k : somme des "k" moments des actions extérieures motrices par rapport au centre du cercle.

ΣMR_m : somme des "m" moments des actions extérieures résistantes par rapport au centre du cercle.

Comme précédemment, l'équation ci-dessus est de type implicite en F et se résout par itérations successives. En général, la convergence du coefficient de sécurité vers une valeur finale est rapide. Cependant, si le nombre d'itérations atteint la valeur limite adoptée de 50 itérations, le programme affiche un message dans la liste des vérifications. Cette valeur limite d'itérations est atteinte lorsque le système présente une situation particulière qui déstabilise la convergence vers l'équilibre (par exemple, des densités de terrain singulières, etc.).

Les itérations se terminent lorsque la différence entre la valeur du coefficient de sécurité calculée à l'itération "j" et celle calculée à l'itération "j+1" est inférieure ou égale à 0,001 ($|F_j - F_{j+1}| \leq 0,001$).

2.3. Processus de calcul

La procédure employée par le programme pour la détermination du cercle dont le coefficient de sécurité est minimal consiste à définir une première maille de points, qui seront les centres des cercles analysés, dans le plan de la section transversale étudiée. Cette première maille de centres couvre une largeur horizontale égale à 4 fois la hauteur de soutènement et une hauteur verticale égale à 2 fois la hauteur de soutènement. Dans le cas où le terrain possède une banquette à l'arrière du mur, la hauteur de la maille sera augmentée en ajoutant 2 fois la hauteur de la banquette. Le nombre de divisions de chaque côté de cette première maille est de 10.

Une fois l'ensemble de cercles représentatifs de chaque nœud de la maille calculé, on détermine le point "P1" de celle-ci possédant le plus petit coefficient de sécurité. A la suite de quoi, on définit une autre maille, de plus petites dimensions, dont le centre est ce point "P1" et on procède de la même manière, jusqu'à obtenir le point "P2" possédant le plus petit coefficient de cette nouvelle maille. On procède ainsi jusqu'à atteindre le nombre de 3 mailles, cercles ou approximations, obtenant finalement entre tous les cercles proposés, le coefficient de sécurité minimal de tous les calculs, dont le centre sera le point "P3" de la troisième itération. Les dimensions de la 2^{ème} et 3^{ème} maille sont égales à 0,40 fois la dimension de la maille précédente, et le nombre de divisions de chaque côté d'elles est de 6.

En chaque point de la maille, des cercles de rayons croissants sont tracés, en partant d'un rayon minimal tel que le cercle s'encastre de 0,50 m dans le terrain et jusqu'à un rayon maximal qui est la plus grande valeur entre:

- Le rayon minimal + 2 mètres
- Le rayon atteignant la couche la plus profonde + 2 fois la hauteur de soutènement des terres
- Le rayon atteignant la cote du point le plus profond de l'élément de soutènement + la hauteur de soutènement des terres

Cependant, une fois que la valeur du rayon atteint la cote de la couche la plus profonde définie par l'utilisateur, et que pour 10 cercles consécutifs les coefficients de sécurité sont de valeur croissante, le programme n'approfondit pas avec plus de cercles; dans le cas contraire, il continue de tracer des cercles de rayons de plus en plus grands jusqu'à ce qu'une des conditions soit vérifiée.

Avant de calculer le coefficient de sécurité du cercle proposé, différents contrôles de validation du cercle sont réalisés. A savoir, sont écartés les cercles pénétrant dans la roche, ceux qui ne possèdent pas de dénivellement dans le terrain traversé, ceux qui coupent un tronçon sans terrain, ceux dont le centre est à une cote telle qu'ils interceptent avec le terrain en des points de cote supérieure à leur centre.

Les figures suivantes schématisent les types de cercles écartés:

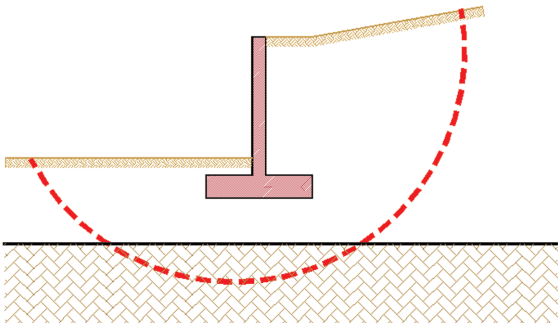


Fig. 2.1. Cercle non valide car pénètre dans la couche rocheuse.

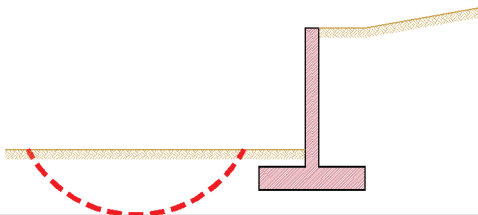


Fig. 2.2. Cercle non valide car ne contient pas de dénivellement de terrain.

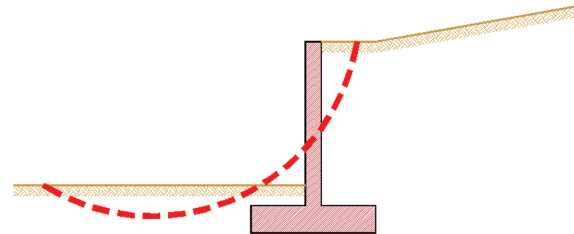


Fig. 2.3. Cercle non valide car possède un tronçon qui ne coupe pas le terrain.

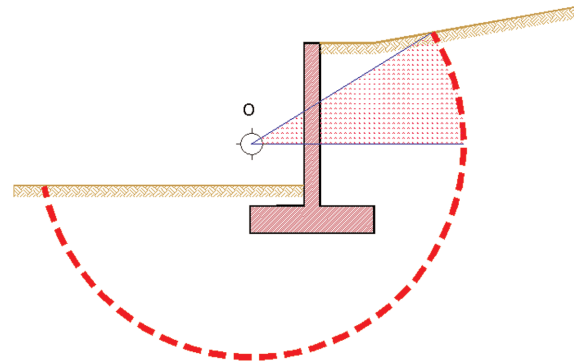


Fig. 2.4. Cercle non valide car son centre est à une cote inférieure à celles de points intersection du cercle avec le terrain.

3. Bibliographie de référence

- I. MECANIQUE DES SOLS APPLIQUEE AU TRAVAUX PUBLICS ET AU BATIMENT.** Karl Terzaghi – Ralph B. Peck. Dunod 1961.
- II. RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS PARA EL PROYECTO DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS.** ROM 0.5.94. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- III. FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN.** Joseph E. Bowles. Quinta Edición. Editorial Mc Graw Hill.
- IV. GEOTECNIA Y CIMENTOS. MECÁNICA DEL SUELO Y DE LAS ROCAS.** José A. Jiménez Salas. José L. de Justo Alpañes. Alcibiades A. Serrano González.
- V. CIMENTACIONES.** W.E. Schulze y K. Simmer. Editorial Blume.

4. Exemple n° 1. Murs de soutènement en béton armé

4.1. Cercle de glissement le plus défavorable d'un mur de soutènement en console

4.1.1. Données du problème

Observez le mur de la figure suivante, qui est supposé vérifier le coefficient de sécurité minimal obtenu via l'utilisation du programme **Murs de soutènement en béton armé**.

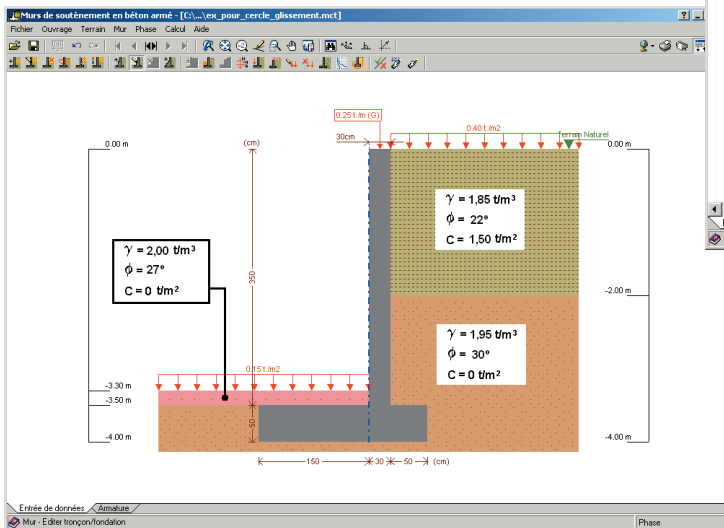


Fig. 4.1

Le programme donne le coefficient de sécurité minimal $F = 1,696$ et la représentation des isovaleurs du coefficient de sécurité des cercles de glissement proposés et indiqués sur la figure 4.2.

4.1.2. Résultats du programme

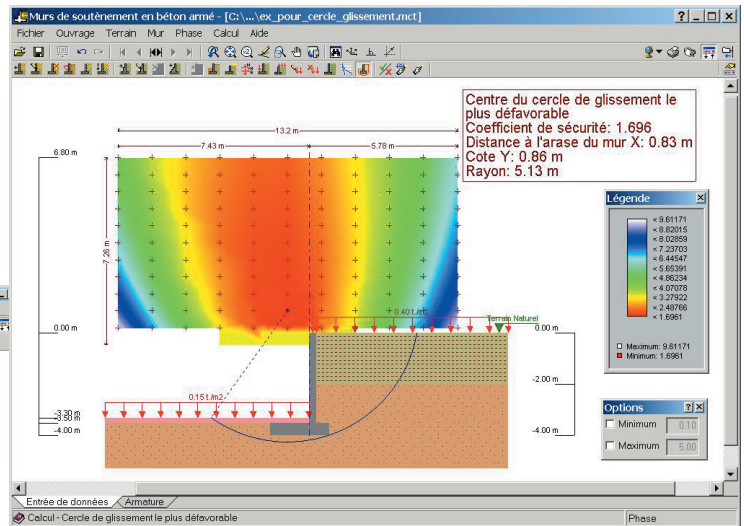


Fig. 4.2

Pour résoudre le problème, on commence par tracer le cercle de glissement en question sur le profil du terrain. Ensuite on divise la masse glissante en tranches, comme représenté sur la figure 4.3.

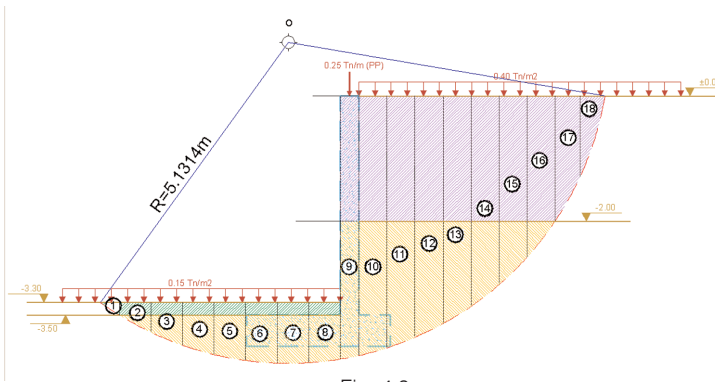


Fig. 4.3

4.1.3. Calculs de comparaison avec les résultats du programme

Ces calculs sont réalisés via une liste de calcul permettant de mener à bien des processus itératifs pour la détermination du coefficient de sécurité du cercle analysé.

Calcul des moments des différents acteurs sur le terrain:

Mur

$$\text{Aire du mur (m)} = 2,30 \times 0,50 + 3,50 \times 0,30 = 2,20 \text{ m}^2$$

$$\text{Poids spécifique du mur}^1 = 0,60 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Coordonnée X du centre de gravité du mur} = -0,11136 \text{ m}$$

$$\text{Moment du poids du mur} =$$

$$= 2,20 \text{ m}^2 \times 0,60 \text{ t/m}^3 \times (0,825 \text{ m} - 0,11136 \text{ m}) = 0,942 \text{ tm/m}$$

¹ Le poids spécifique du mur est calculé comme $2,50 \text{ t/m}^3$ moins le poids spécifique moyen pondéré du terrain à la hauteur du mur. En effet, comme l'existence du mur n'est pas considérée dans l'étude des tranches, seule la différence de poids entre le mur et le sol doit être prise en compte.

Surcharges

• A l'arrière

$$\begin{aligned} \text{Longueur de surcharge à l'arrière dans le cercle} &= \\ &= (4,23384 \text{ m} - 0,30 \text{ m}) = 3,9338 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Résultante de la surcharge à l'arrière} &= \\ &= 3,9338 \text{ m} \times 0,40 \text{ t/m}^2 = 1,57354 \text{ t/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moment de la surcharge à l'arrière} &= \\ &= (0,50 \times 3,9338 \text{ m} + 0,30 + 0,825 \text{ m}) \times 1,57354 \text{ t/m} = \\ &= 4,86526 \text{ tm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moment des surcharges à l'arrière / R} &= \\ &= 4,86526 \text{ tm/m} / 5,1314 \text{ m} = 0,94814 \text{ tm/m} \end{aligned}$$

• A l'avant

$$\begin{aligned} \text{Longueur de surcharge à l'avant dans le cercle} &= \\ &= 3,8293 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Résultante de la surcharge à l'avant} &= \\ &= 3,8293 \text{ m} \times 0,15 \text{ t/m}^2 = 0,5744 \text{ t/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moment de la surcharge à l'avant} &= \\ &= (-0,50 \times 3,8293 \text{ m} + 0,825 \text{ m}) \times 0,5744 \text{ t/m} = \\ &= -0,6259 \text{ tm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moment des surcharges à l'avant / R} &= \\ &= -0,6259 \text{ tm/m} / 5,1314 \text{ m} = -0,12197 \text{ tm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moment des surcharges / R} &= \\ &= (4,86526 \text{ tm/m} - 0,6259 \text{ tm/m}) / 5,1314 \text{ m} = \\ &= 0,82616 \text{ tm/m} \end{aligned}$$

Charges en tête

$$\begin{aligned} \text{Moment de la charge verticale en tête} &= \\ &= 0,25 \text{ t/m} \times (0,825 \text{ m} + 0,15 \text{ m}) = 0,24375 \text{ tm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moment de la charge verticale en tête / R} &= \\ &= 0,24375 \text{ tm/m} / 5,1314 \text{ m} = 0,0475 \text{ tm/m} \end{aligned}$$

Le tableau suivant montre la liste des calculs employée pour la vérification, dans laquelle apparaissent les données des tranches et les valeurs en amont des calculs.

Conclusions

Comme vous pouvez le voir, le calcul par comparaison affiche la même valeur pour le coefficient de sécurité du cercle étudié que le calcul réalisé via le programme qui est :

$$F_s = 1,696$$

OUVRAGE: EX_MUR.MCT

Terrain Supérieur Avant	Terrain Supérieur Arrière
Cote = -3,30 m $\emptyset = 27,0^\circ$ $\gamma = 2,00 \text{ t/m}^2$ $c = 0,00 \text{ t/m}^2$	Cote = 0,00 m $\emptyset = 22,0^\circ$ $\gamma = 1,85 \text{ t/m}^2$ $c = 1,50 \text{ t/m}^2$
Terrain Inférieur Avant	Terrain Inférieur Arrière
Cote = -3,50 m $\emptyset = 30,0^\circ$ $\gamma = 1,95 \text{ t/m}^2$ $c = 0,00 \text{ t/m}^2$	Cote = -2,00 m $\emptyset = 30,0^\circ$ $\gamma = 1,95 \text{ t/m}^2$ $c = 0,00 \text{ t/m}^2$

Cercle le plus défavorable
 $X = -0,825 \text{ m}$
 Cote = 0,860 m
 $R = 5,131 \text{ m}$

Moment poids effectif mur = 0,184 tm/m
 Moment des surcharges arrière = 0,948 tm/m
 Moment des surcharges avant = -0,122 tm/m
 Moment résultant surcharges = 0,826 tm/m
 Moment charge couronnement = 0,048 tm/m

Coef. Sécu = 1,696

Tranche N°	X [m]	Cote [m]	Zone	b [m]	α [°]	$\tan \alpha$	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$	W [t/m]	Δ surch [t/m]	$c + b$ [t/m]	$\tan \emptyset$	$\tan \emptyset (W + \Delta \text{ surch})$ [t/m]	$m \alpha$	Numérateur	Dénominateur
1	-3,6801	-3,4000	Avant	0,2984	-33,8306°	-0,67022	0,83069	-0,55674	1,9188	0,1194	0,0000	0,50953	1,0385	0,6634	1,5653	-1,0683
2	-3,2787	-3,6376	Avant	0,5044	-28,6151°	-0,54556	0,87786	-0,47892	3,4771	0,2018	0,0000	0,57735	2,1240	0,7148	2,9713	-1,6653
3	-2,7743	-3,8789	Avant	0,5044	-22,3590°	-0,41133	0,92482	-0,38041	3,7145	0,2018	0,0000	0,57735	2,2610	0,7953	2,8429	-1,4130
4	-2,2699	-4,0568	Avant	0,5044	-16,3762°	-0,29387	0,95943	-0,28194	3,8894	0,2018	0,0000	0,57735	2,3620	0,8635	2,7355	-1,0966
5	-1,7654	-4,1780	Avant	0,5044	-10,5733°	-0,18666	0,98302	-0,18349	4,0086	0,2018	0,0000	0,57735	2,4309	0,9206	2,6406	-0,7356
6	-1,2610	-4,2466	Avant	0,5044	-4,8805°	-0,08539	0,99637	-0,08508	4,0761	0,2018	0,0000	0,57735	2,4698	0,9674	2,5530	-0,3468
7	-0,7566	-4,2648	Avant	0,5044	0,7647°	0,01335	0,99991	0,01335	4,0940	0,2018	0,0000	0,57735	2,4802	1,0045	2,4692	0,0546
8	-0,2522	-4,2330	Avant	0,5044	6,4169°	0,11247	0,99373	0,11176	4,0626	0,2018	0,0000	0,57735	2,4621	1,0318	2,3863	0,4541
9	0,1500	-4,1756	Arrière	0,3000	10,9580°	0,19362	0,98177	0,19009	2,3827	0,1200	0,0000	0,57735	1,4450	1,0465	1,3808	0,4529
10	0,5240	-4,0855	Arrière	0,4479	15,2572°	0,27277	0,96475	0,26315	3,4789	0,1792	0,0000	0,57735	2,1120	1,0543	2,0032	0,9155
11	0,9719	-3,9406	Arrière	0,4479	20,5213°	0,37431	0,93654	0,35056	3,3524	0,1792	0,0000	0,57735	2,0389	1,0559	1,9311	1,1752
12	1,4198	-3,7476	Arrière	0,4479	25,9752°	0,48720	0,89896	0,43798	3,1838	0,1792	0,0000	0,57735	1,9416	1,0481	1,8526	1,3945
13	1,8678	-3,5002	Arrière	0,4479	31,6984°	0,61758	0,85083	0,52545	2,9677	0,1792	0,0000	0,57735	1,8169	1,0297	1,7645	1,5594
14	2,3157	-3,1881	Arrière	0,4479	37,8057°	0,77584	0,79009	0,61299	2,6951	0,1792	0,0000	0,57735	1,6595	0,9987	1,6616	1,6521
15	2,7636	-2,7944	Arrière	0,4479	44,4794°	0,98199	0,71350	0,70065	2,3512	0,1792	0,0000	0,57735	1,4609	0,9520	1,5346	1,6474
16	3,2115	-2,2873	Arrière	0,4479	52,0569°	1,28256	0,61488	0,78862	1,9082	0,1792	0,0000	0,57735	1,2052	0,8833	1,3644	1,5049
17	3,6351	-1,6446	Arrière	0,3992	60,8835°	1,78078	0,48963	0,87193	1,2145	0,1597	0,5988	0,40403	0,5552	0,6973	1,6548	1,0589
18	4,0343	-0,6446	Arrière	0,3992	72,7958°	3,22963	0,29578	0,95526	0,4760	0,1597	0,5988	0,40403	0,2568	0,5233	1,6349	0,4547
Sommes-->															36,9465	5,9367
															36,947	7,056

Coef. Sécu = 5,236

Tolérance 3,5401

5. Exemple n° 2. Ecrans de soutènement

5.1. Cercle de glissement le plus défavorable en une phase quelconque de réalisation d'un écran

5.1.1. Données du problème

Observez l'écran de la figure suivante qui est supposé vérifier le coefficient de sécurité minimal obtenu via l'utilisation du programme **Ecrans de soutènement**.

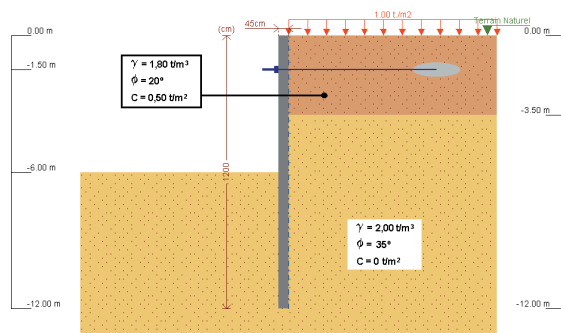


Fig. 5.1

Le programme donne le coefficient de sécurité minimal $F = 3,723$ et la représentation des isovaleurs du coefficient de sécurité des cercles de glissement proposés et indiqués sur la figure 5.2.

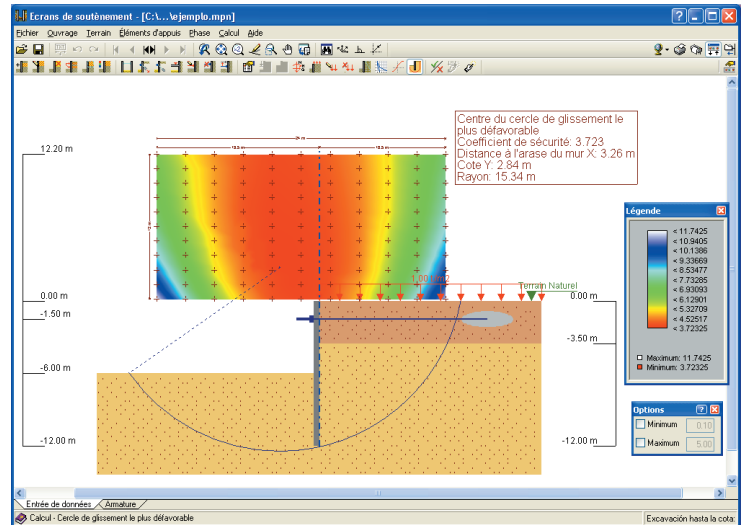


Fig. 5.2

5.1.2. Résultats du programme

Pour résoudre le problème, on commence par tracer le cercle de glissement en question sur le profil du terrain. Ensuite on divise la masse glissante en tranches, comme représenté sur la figure 5.3.

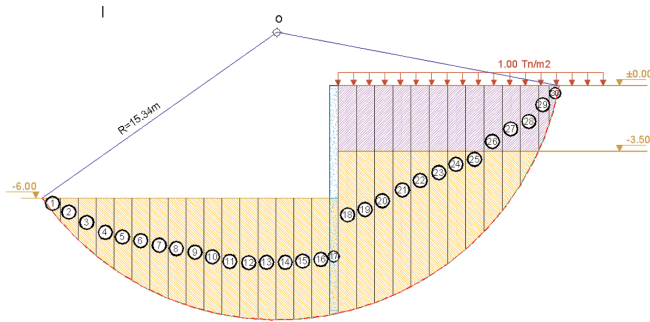


Fig. 5.3

5.1.3. Calculs de comparaison avec les résultats du programme

Ces calculs sont réalisés via une liste de calcul permettant de mener à bien des processus itératifs pour la détermination du coefficient de sécurité du cercle analysé.

Calcul des moments des différents acteurs sur le terrain:

Mur

$$\text{Aire du mur} = (0,45 \times 12) \text{ m}^2 = 5,40 \text{ m}^2$$

$$\text{Poids spécifique du mur}^1 = 0,5583 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Coordonnée X du centre de gravité du mur} = -0,225 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Moment du poids du mur} &= \\ &= 5,40 \text{ m}^2 \times 0,5583 \text{ t/m}^3 \times (3,26 \text{ m} - 0,225 \text{ m}) = \\ &= 9,15 \text{ tm/ m.} \end{aligned}$$

¹ Le poids spécifique du mur est calculé comme $2,50 \text{ t/m}^2$ moins le poids spécifique moyen pondéré du terrain à la hauteur du mur. En effet, comme l'existence du mur n'est pas considérée dans l'étude des tranches, seule la différence de poids entre le mur et le sol doit être prise en compte.

Surcharges

• A l'arrière

$$\begin{aligned} \text{Longueur de surcharge à l'arrière dans le cercle} &= \\ &= 11,8148 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Résultante de la surcharge à l'arrière} &= \\ &= 11,8148 \text{ m} \times 1,00 \text{ t/m}^2 = 11,8148 \text{ t/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moment de la surcharge à l'arrière} &= \\ &= (0,50 \times 11,8148 \text{ m} + 3,26 \text{ m}) \times 11,8148 \text{ t/m} = \\ &= 108,316 \text{ tm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moment des surcharges à l'arrière} / R &= \\ &= 108,316 \text{ tm/m} / 15,34 \text{ m} = 7,061 \text{ tm/m} \end{aligned}$$

Le tableau suivant montre la liste des calculs employée pour la vérification, dans laquelle apparaissent les données des tranches et les valeurs en amont des calculs.

Conclusions

Comme vous pouvez le voir, le calcul par comparaison affiche la même valeur pour le coefficient de sécurité du cercle étudié que le calcul réalisé via le programme qui est :

$$F_s = 3,723$$

OUVRAGE: EX ECRAN.MCT

Terrain Supérieur Avant Cote = -10,000,00 m $\emptyset = 0,0^\circ$ $\gamma = 0,00 \text{ t/m}^3$ $c = 0,00 \text{ t/m}^2$	Terrain Supérieur Arrière Cote = 0,00 m $\emptyset = 20,0^\circ$ $\gamma = 1,80 \text{ t/m}^3$ $c = 0,50 \text{ t/m}^2$
Terrain Inférieur Avant Cote = -6,00 m $\emptyset = 35,0^\circ$ $\gamma = 2,00 \text{ t/m}^3$ $c = 0,00 \text{ t/m}^2$	Terrain Inférieur Arrière Cote = -3,50 m $\emptyset = 35,0^\circ$ $\gamma = 2,00 \text{ t/m}^3$ $c = 0,00 \text{ t/m}^2$

Cercle le plus défavorable
 X = -3,260 m
 Cote = 2,840 m
 R = 15,340 m

Moment poids effectif du mur = 0,597 tm/m
 Moment des surcharges arrière = 7,061 tm/m
 Moment des surcharges avant = 0,000 tm/m
 Moment résultant surcharges = 7,061 tm/m
 Moment charge couronnement = 0,000 tm/m

Coef. Sécu = 3,723

Tranche N°	X [m]	Cote [m]	Zone	b [m]	α [°]	$\tan \alpha$	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$	W [t/m]	Δ surch [t/m]	$c \cdot b$ [t/m]	$\tan \emptyset$	$\tan \emptyset \cdot (W + \Delta \text{ surch})$ [t/m]	m α	Numérateur	Dénominateur
1	-15,3172	-6,6118	Avant	0,9592	-51,9066°	-1,27565	0,61695	-0,78701	12,0122	0,9592	0,0000	0,70021	9,0827	0,4689	19,3684	-9,4537
2	-14,3580	-7,7272	Avant	0,9592	-46,4033°	-1,05023	0,68958	-0,72421	14,1521	0,9592	0,0000	0,70021	10,5810	0,5534	19,1205	-10,2491
3	-13,3988	-8,6540	Avant	0,9592	-41,5155°	-0,88210	0,74993	-0,66152	15,9298	0,9592	0,0000	0,70021	11,8258	0,6255	18,9053	-10,5378
4	-12,4397	-9,4356	Avant	0,9592	-36,7889°	-0,74779	0,80095	-0,59887	17,4293	0,9592	0,0000	0,70021	12,8758	0,6882	18,7086	-10,4379
5	-11,4805	-10,0990	Avant	0,9592	-32,4289°	-0,63533	0,84406	-0,53625	18,7018	0,9592	0,0000	0,70021	13,7668	0,7432	18,5234	-10,0289
6	-10,5213	-10,6616	Avant	0,9592	-28,2719°	-0,53781	0,88071	-0,47366	19,7811	0,9592	0,0000	0,70021	14,5225	0,7916	18,3449	-9,3694
7	-9,5621	-11,1358	Avant	0,9592	-24,2722°	-0,45093	0,91160	-0,41107	20,6908	0,9592	0,0000	0,70021	15,1594	0,8343	18,1703	-8,5054
8	-8,6030	-11,5303	Avant	0,9592	-20,3954°	-0,37181	0,93731	-0,34850	21,4477	0,9592	0,0000	0,70021	15,6894	0,8718	17,9972	-7,4745
9	-7,6438	-11,8517	Avant	0,9592	-16,6143°	-0,29839	0,95825	-0,26593	22,0643	0,9592	0,0000	0,70021	16,1212	0,9045	17,8237	-6,3088
10	-6,6846	-12,1047	Avant	0,9592	-12,9066°	-0,22915	0,97474	-0,22336	22,5496	0,9592	0,0000	0,70021	16,4610	0,9327	17,6482	-5,0367
11	-5,7255	-12,2928	Avant	0,9592	-9,2534°	-0,16292	0,98699	-0,16080	22,9103	0,9592	0,0000	0,70021	16,7136	0,9567	17,4692	-3,6840
12	-4,7663	-12,4183	Avant	0,9592	-5,6379°	-0,09872	0,99516	-0,09824	23,1510	0,9592	0,0000	0,70021	16,8821	0,9767	17,2851	-2,2744
13	-3,8071	-12,4827	Avant	0,9592	-2,0449°	-0,03571	0,99936	-0,03568	23,2747	0,9592	0,0000	0,70021	16,9687	0,9927	17,0943	-0,8305
14	-2,8479	-12,4870	Avant	0,9592	1,5400°	0,02688	0,99964	0,02687	23,2828	0,9592	0,0000	0,70021	16,9744	1,0047	16,8951	0,6257
15	-1,8888	-12,4310	Avant	0,9592	5,1310°	0,08979	0,99599	0,08943	23,1755	0,9592	0,0000	0,70021	16,8993	1,0128	16,6855	2,0726
16	-0,9296	-12,3142	Avant	0,9592	8,7424°	0,15378	0,98838	0,15199	22,9514	0,9592	0,0000	0,70021	16,7423	1,0170	16,4631	3,4884
17	-0,2250	-12,1950	Avant	0,4500	11,4124°	0,20186	0,98023	0,19787	10,6605	0,4500	0,0000	0,70021	7,7797	1,0174	7,6463	2,1094
18	0,4868	-12,0269	Arrière	0,9735	14,1451°	0,25202	0,96968	0,24438	22,7350	0,9735	0,0000	0,70021	16,6009	1,0156	16,3453	5,5569
19	1,4603	-11,7467	Arrière	0,9735	17,9315°	0,32360	0,95143	0,30788	22,1895	0,9735	0,0000	0,70021	16,2189	1,0093	16,0691	6,8317
20	2,4338	-11,3945	Arrière	0,9735	21,8012°	0,40000	0,92848	0,37139	21,6038	0,9735	0,0000	0,70021	15,7388	0,9963	15,7652	7,9862
21	3,4073	-10,9647	Arrière	0,9735	25,7791°	0,48297	0,90048	0,43490	20,6670	0,9735	0,0000	0,70021	15,1528	0,9823	15,4264	8,9881
22	4,3808	-10,4498	Arrière	0,9735	29,8961°	0,57493	0,86693	0,49643	19,6644	0,9735	0,0000	0,70021	14,4508	0,9607	15,0425	9,8013
23	5,3543	-9,8393	Arrière	0,9735	34,1921°	0,67940	0,82716	0,56197	18,4757	0,9735	0,0000	0,70021	13,6184	0,9328	14,5989	10,3828
24	6,3278	-9,1183	Arrière	0,9735	38,7215°	0,80177	0,78020	0,62554	17,0719	0,9735	0,0000	0,70021	12,6356	0,8978	14,0734	10,6791
25	7,3013	-8,2651	Arrière	0,9735	43,5621°	0,95103	0,72463	0,68914	15,4108	0,9735	0,0000	0,70021	11,4724	0,8542	13,4302	10,6202
26	8,2748	-7,2455	Arrière	0,9735	48,8349°	1,14370	0,65823	0,75282	13,4256	0,9735	0,0000	0,70021	10,0824	0,7998	12,6061	10,1070
27	9,2483	-6,0001	Arrière	0,9735	54,7497°	1,41495	0,57715	0,81664	11,0008	0,9735	0,0000	0,70021	8,3845	0,7307	11,4742	8,9836
28	10,2218	-4,4057	Arrière	0,9735	61,7445°	1,86066	0,47340	0,88085	7,8964	0,9735	0,0000	0,70021	6,2108	0,6391	9,7188	6,9555
29	10,9851	-2,8017	Arrière	0,5531	68,3943°	2,52498	0,36822	0,92974	2,7895	0,5531	0,2766	0,36397	1,2166	0,4591	3,2524	2,5935
30	11,5382	-1,0517	Arrière	0,5531	75,2659°	3,80255	0,25433	0,96712	1,0471	0,5531	0,2766	0,36397	0,5824	0,3489	2,4622	1,0127
Sommes->															454,414	14,6028
															454,414	22,260
															Coef. Sécu = 20,414	
															Tolérance	16,8905