Macro-commande CALC_ STAB_PENTE

1 But

Vérifier la stabilité statique des ouvrages en remblai modélisés en 2D, qui peuvent être les barrages en remblai, les talus et les digues autour des réservoirs etc. La macro-commande CALC_STAB_PENTE permet de calculer le facteur de sécurité représentant la marge de stabilité disponible, qui est défini par le rapport entre la force de résistance au cisaillement et la force d'entraînement induit par les chargements appliqués. CALC_STAB_PENTE regroupe deux catégories de méthodes afin de munir des moyens de vérification et de s'adapter aux pratiques de l'industrie hydraulique dans différentes régions du monde .

Le premier type de calcul (METHODE_STAB = 'SRM') s'effectue par réduction progressive d es paramètres de résistance au cisaillement (« *strength reduction method* » en anglais, appelée SRM) jusqu'à divergence du calcul aux éléments finis. Cette divergence traduit le moment de rupture de la structure globale. Il est possible d'indiquer la pente à analyser, quand il en existe plusieurs dans le modèle, par la définition d'une zone SRM.

Le deuxième type de calcul (METHODE_STAB = 'LEM') est basée sur la théorie d'équilibre limite (LEM). On calcule le facteur de sécurité par résolution du bilan des forces et des moments des tranches de sol considérées comme solides rigides. La macro s'équipe des algorithmes d'optimisation pour localiser la surface de rupture. 4 méthodes LEM sont disponibles :

- FELLENIUS et BISHOP simplifié pour les surfaces de rupture circulaires.
- SPENCER et MORGENSTERN-PRICE pour les surfaces de rupture non-circulaires.

La macro-commande CALC_STAB_PENTE fournit en sortie une table contenant les facteurs de sécurité testés et les informations à propos de la géométrie de la surface de rupture . Si demandé, la macro-commande génère en supplément un concept evol_noli pour visualisation de la surface de rupture.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Syntaxe

```
RESTAB = CALC_STAB_PENTE(

 ♦    CHAM_MATER       =  chmat ,                                    [
cham_mater ]

 ♦    METHODE_STAB     =  /'SRM' ,                                   [
DEFAUT                                                              ]
                         /' LEM '

S i METHODE_STAB = 'SRM'
{

     ♦   MODELE          =  mo,                              [modele]

     # on choisit la zone où s'applique la SRM.

     ♦   / GROUP_MA       =  lgroupma ,                              [
l_gr_maille ]
         / TOUT           =  'OUI'

     # liste des chargements à appliquer.

     ♦    EXCIT      = _ F(
                          ♦                    CHARGE          =     chi,
[char_meca]
                        FONC_MULT = fi,                     [fonc/formule]
                        TYPE_CHARGE = /'FIXE_CSTE'                [DEFAUT]
                                      /'SUIV'
                                      /' DIDI '
                        ) ,
     # liste des instants

     ♦    INCREMENT       =   C_INCREMENT('MECANIQUE')

     # other STAT_NON_LINE configurations
      ◊   CONVERGENCE      =    C_CONVERGENCE('STAT_NON_LINE')

      ◊  COMPORTEMENT     =    C_COMPORTEMENT('STAT_NON_LINE')

     #Vérification : Un seul cpt parmi 'MORH_COULOMB' et 'DRUCK_PRAGER' est
      # autorisées dans la zone de SRM.

         FS = _F(
          # valeur initiale du FS
         ◊    FS_INIT         =    / 1.0 ,                          [
DEFAUT ]
                                  /f0                              [R]

         # précision initiale
          ◊   INCR_INIT        =    / 0.1 ,                           [
DEFAUT ]
                                    /p0                            [R]

         # précision initiale
```


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
                ◊   RESI_MAXI        =    / 0.01 ,                          [
      DEFAUT ]
                                          /p fin
      [R]
                # nombre maximum d'itération s SRM
               ◊   ITER_MAXI         =    /100,                        [DEFAUT]
                                          /iter_max                         [I]
               # loi de variation de la précision
                ◊   METHODE           =    / ' EXPO NENTIELLE ' ,
      [ DEFAUT ]
                                          /'LINEAIRE'
                Si METHODE = 'LINEAIRE'
                {
                   ◊   ITER_RAFF_LINE       =    nbpas,                    [I]
               }
           )
      }

    Si METHODE_STAB = 'LEM'
    {
         ◊   METHODE_LEM        =   /' BISHOP '                          [ DEFAUT
]
                                    /' FELLENIUS '
                                    /' SPENCER '
                                    /' MORGENSTERN_PRICE '

         ◊     CRITERE                                =          /'MOHR_COULOMB'
[DEFAUT]
                                    /'DRU CK _PRAGER'

         ♦   GROUP_MA           =    profil_pente                          [
l_gr_maille ]

        ◊          NB    _TRANCHE                              =          /    10
[DEFAUT]
                                                                /           Nt
[I]

         RAFF_MAIL = _F(
                      ◊          N    B_RAFF_MAXI                =          /    4
[DEFAUT]
                                                                    /   N   raff
[I]
                      ◊          RAFF_    CRIT_STAB          =          /    1e-3
[DEFAUT]
                                          / raff_ crit_stab                 [
R ]
                    )

         ♦   X1 _MIN I        =  x1_min                                     [
R ]
         ♦   X1 _MAX I        =  x1_max                                     [
R ]
         ♦   X2 _MIN I        =  x2_min                                     [
R ]
         ♦   X2 _MAX I        =  x2_max                                     [
R ]

         S i METHODE_LEM = 'BISHOP' ou 'FELLENIUS' :
```


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
        {
              ◊       N   B   _   P   OINT_1                          =       /   5
[DEFAUT]
                                    /nb_                                  point_1
[I]
              ◊       N   B   _   P   OINT_2                          =       /   5
[DEFAUT]
                                    /                nb_                  point_2
[I]
              ◊       Y_MIN   I                                      =       y_min
[I]
              ◊      Y_   MAX   I                                  =       y_   max
[I]

        }
         Si METHODE_LEM = 'MORGENSTERN_PRICE' ou 'SPENCER' :
        {

             # Paramètres de l'algorithme EFWA

             ALGO _ EFWA = _F(
                   ◊   ETAT_INIT   =   tabfs                          [table_aster]

                   ◊ ITER_MAXI      =    / 1e 2                                  [
DEFAUT ]
                                    /                                iter_max
[I]

                    ♦   A      =   /efwa_a                                [R]

                    ◊   N      =   /5                                  [DEFAUT]
                                    /efwa_n                                  [I]
                      ◊         M                                  =         /40
[DEFAUT]
                                    /efwa_m                                  [I]
                      ◊          MG                                 =          /5
[DEFAUT]
                                    /efwa_mg                                 [I]
                     ◊         SA                                =         /   0.04
[DEFAUT]
                                    / efwa_sa                                [
R ]
                     ◊         SB                                 =         /   0.8
[DEFAUT]
                                    / efwa_sb                                [
R ]
                      ◊           NB_STAB_MAXI                =           /    10
[DEFAUT]
                                         / stab_maxi                         [
I ]
                    ◊     CRIT_   STAB                        =         /   1e-   3
[DEFAUT]
                                         / efwa_resi                         [
R ]
                      ◊          MARGE_PENTE                  =          /    0.1
[DEFAUT]
                                         / marge                             [
R ]
                )
```


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
        }
    }
```

    # **evol_noli visualisant la surface de glissement**

```
    ◊    CHAM_DEFO        =    CO(chamdef) ,                                [ evol
_noli ]
```


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Description de la macro-commande

Selon les recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, la vérification de la stabilité des pentes est indispensable dans les périodes de conception et d'opération des ouvrages. Cette analyse a pour objectif de prévenir la rupture soudaine de la pente en évaluant quantitativement le risque de collapse, soit le facteur de sécurité. La stabilité des pentes dépend à la fois de la géométrie, des propriétés mécaniques du remblai, et des chargements mécaniques et hydrauliques tels que la gravité, la pression hydrostatique et la pression interstitielle engendrée par l'infiltration d'eau au sein de l'ouvrage.

La macro-commande CALC_STAB_PENTE permet de calculer le facteur de sécurité via deux approches :

1. **Méthode SRM** : la méthode de réduction progressive des paramètres liés à la résistance au cisaillement du matériau (nommé méthode de SRM). Cette méthode a été proposée par Griffiths en 1999 [1]. La méthode SRM implémentée a été validée seulement sur les pentes modélisées en 2D. L'utilisation sur les modèles 3D est également possible mais la pertinence du résultat doit être vérifiée par l'utilisateur .

2. **Méthode LEM** : une série des méthodes basées sur la théorie d'équilibre limite (nommé méthode LEM), y compris les procédures de Bishop simplifiée, Fellenius, Spencer et Morgenstern-Price [2]. Ces méthodes découpent la pente en plusieurs tranches qui sont considérées comme corps rigides. Etant donnée une surface de rupture potentielle, le calcul du facteur de sécurité se fait par résolution du bilan des forces et des moments de l'ensemble des tranches. Le facteur de sécurité est défini par le rapport entre la force de résistance et la force d'entraînement le long de la surface de rupture. CALC_STAB_PENTE s'équipe également des algorithmes d'optimisation pour localiser les surfaces de rupture minimisant le facteur de sécurité.

La méthode SRM met à profit la pertinence et la fidélité de la méthode aux éléments finis pour analyser la stabilité des pentes sans avoir besoin de supposer par avance les cercles de glissement. En effet, en utilisant le critère de rupture de type Mohr-Coulomb, la méthode SRM définit le facteur de sécurité comme étant le rapport entre les paramètres matériaux initiaux et ceux réduits conduisant à la divergence du calcul non-linéaire sous les chargements appliqués :

$$FS = \frac{c}{c_i} = \frac{\tan(\varphi)}{\tan(\varphi_i)} = \frac{\tan(\psi)}{\tan(\psi_i)}$$

où ψ est l'angle de dilatance du matériau , c et φ représentent respectivement la force de cohésion et l'angle de frottement du remblai. CALC_STAB_PENTE permet de définir la zone de SRM par un groupe des mailles indépendant.

Les avantages de la méthode SRM sont les suivants :
- Possibilité d'appliquer divers types de chargements mécaniques, tels que la la pression hydrostatique et la force d'inertie en condition sismique (pseudo-statique).
- Calcul de champ de contraintes fidèle à la réalité sans la nécessité de présupposer les surfaces de rupture, ce qui mène au résultat de FS plus pertinent que celui de la méthode LEM.
- Visualisation naturelle de la surface de rupture caractérisée par la déformation plastique élevée.

Cependant, si l'utilisateur n'est pas suffisamment expérimenté, la méthode SRM prendra généralement plus de temps de calcul et la pertinence du résultat n'est pas garantie à cause du calcul FEM mal configuré.

Contrairement à la méthode SRM, la méthode LEM est indépendant du calcul FEM, mais demande de présupposer les surfaces potentielles de rupture et fait l'hypothèse sur les forces d'interaction entre les tranches. Etant donnée la simplicité et efficacité de calcul, cela n'empêche que la méthode LEM est devenue la plus populaire dans l'industrie hydraulique et est recommandée par les réglementations de la conception et vérification des ouvrages en remblai.

En sortie de la macro-commande on récupère une table à gauche du signe d'égalité, dont le contenu dépend de la méthode d'analyse choisie :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- **En cas de SRM** : la table contient les facteurs de sécurité testés lors des itérations, ainsi que les valeurs du déplacement total maximal dans la zone SRM. Cette table facilite à la fois la récupération du résultat de stabilité et la vérification de sa pertinence. En effet, le facteur de sécurité se trouve dans la dernière ligne dans la table. La convergence de l'algorithme se vérifie par la tracée progressivement aplatie du facteur de sécurité en fonction du déplacement maximal.
- **En cas de LEM** : la table contient les facteurs de sécurité de la surface critique au cours du raffinement du maillage, ainsi que les paramètres géométrique de la surface de rupture.
  - Pour les procédures Bishop et Fellenius, la surface de rupture est décrite par les abscisses des points d'entrée et de sortie, le rayon, et les coordonnées du centre de la cercle.
  - Pour les procédure Spencer et Morgenstern-Price, la surface de rupture est décrite par les abscisses des points d'entrée et de sortie, et les ordonnées des points intermédiaires décrivant la surface multi-linéaire.

La macro-commande fournit l'option de visualiser le surface de glissement. Si demandé, un concept de type evol_noli sera produit pour ce but.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Opérandes

4.1 Opérandes CHAM_MATER

♦ MODELE = mo

Nom du modèle dont les éléments font l'objet du calcul mécanique. Avec le modèle THM (voir [R7.01.11]) , la macro-commande prend en compte l'effet hydraulique lors de l'analyse de stabilité, ce qui favorise surtout l'évaluation de stabilité des barrages et des digues.

En revanche, les modèles nécessitant la définition des caractéristiques élémentaires via la commande AFFE_CARA_ELEM ne sont pas autorisés par la macro-commande CALC_STAB_PENTE.

♦ CHAM_MATER = chmat

Nom du champ de matériau affecté sur le modèle mo.

Remarque :

Il faut s'assurer que le chmat a été créé en utilisant le même maillage que celui du modèle mo. Sinon, une erreur fatale aura lieu .

4.2 Opérande METHODE_STAB = 'SRM'

♦ METHODE_STAB = 'SRM'

En choisissant la méthode SRM, l'analyse de stabilité des pentes est basée sur le solveur non-linéaire STAT_NON_LINE en vue de chercher itérativement le facteur de sécurité jusqu'à ce que le calcul diverge. Par conséquence, les entrées de cette dernière commande sont également requises par la macro-commande.

4.2.1 Opérande MODELE

♦ MODELE = mo

Nom du modèle dont les éléments font l'objet du calcul mécanique. Avec le modèle THM (voir [R7.01.11]) , la macro-commande prend en compte l'effet hydraulique lors de l'analyse de stabilité, ce qui favorise surtout l'évaluation de stabilité des barrages et des digues.

4.2.2 Opérande GROUP_MA/TOUT

♦ /GROUP_MA = lgroupma
/TOUT = 'OUI'

Liste des groupes des mailles définissant la zone où l'algorithme SRM s'applique. Si on analyse la stabilité du modèle entier, on configure l'opérande TOUT = 'OUI'.

Dans le cas où les groupes des mailles diffèrent de ceux qui sont utilisés dans l'affectation du matériau au maillage, la macro-commande identifiera les matériaux affectant la zone SRM en se basant sur le champ de matériau chmat en entrée, et calcule les groupes des mailles d'intersection entre la zone SRM et la zone d'affectation du matériau en question en vue d'affecter le matériau dégradé dans la zone SRM par le principe de surcharge.

4.2.3 Mot clé EXCIT

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

♦ EXCIT = _F()

Mot clé facteur permettant de décrire à chaque occurrence une charge (sollicitation et condition aux limites), et éventuellement un coefficient multiplicateur et/ou un type de charge.

La configuration de ce mot clé facteur est identique avec la commande STAT_NON_LINE (voir [u4.51.03]), sauf que les types de charge sont limitées entre 'FIXE_CSTE' , 'SUIV' et 'DIDI' . Les types de charges liées à la fonctionnalité PILOTAGE ont été éliminées dans la macro-commande CALC_STAB_PENTE puisqu'elles sont en contradiction avec l'algorithme SRM .

4.2.4 Mot clé INCREMENT, CONVERGENCE et COMPORTEMENT

♦ INCREMENT = _F()

M ot clé facteur définissant les intervalles de temps pris dans la méthode incrémentale.

♦ CONVERGENCE = _F()

Mot clé facteur permettant de contrôler les critères de convergence lors du calcul non-linéaire effectué par la commande STAT_NON_LINE.

♦ COMPORTEMENT = _F()

Mot clé facteur définissant les relations de comportement. Il s'agit d'un mot clé commun à plusieurs commandes. Ses syntaxes sont décrites dans le document [U4.51.11].

Remarque :

1) Il est fortement conseillé d'employer l'option du découpage automatique des pas de temps définie par la commande DEFI_LIST_INST avec l'opérande ECHEC/ACTION = 'DECOUPE' dans le mot clé facteur INCREMENT, afin de mieux capturer le moment de collapse des pentes, d'autant plus que la loi de comportement DRUCKER_PRAGUER évite l'éventuelle singularité de la matrice tangente causée par la surface de charge de la loi de comportement MOHR_COULOMB découpage automatique de l'incrément à plusieurs niveaux exclut le facteur de l'incrément numérique qui conduit probablement à la divergence du calcul non-linéaire et donc rassure la pertinence du résultat d'analyse de stabilité. De même, il est également favorable d'augmenter l'opérande ITER_GLOB_MAXI dans le mot clé CONVERGENCE pour s'assurer que la divergence du calcul est causée principalement par la rupture dans le milieu continu.

2) Dans le mot clé facteur COMPORTEMENT il est possible de définir des relations de comportement différentes sur les différentes parties du modèle. Cependant, similaire au traitement du champ de matériau dans la zone SRM, la macro-commande CALC_STAB_PENTE examine les relations de comportement dans la zone SRM de sorte qu'il existe un et seulement un comportement parmi MOHR_COULOMB et DRUCKER_PRAGUER dans la zone SRM. Sinon, une erreur fatale sera produite . En outre, la définition des relations de comportement sur les mailles n'est pas autorisée par la macro-commande CALC_STAB_PENTE .

4.2.5 Mot clé FS

◊ FS = _F()

M ot clé facteur définissant les paramètres de l'algorithme SRM, y compris la valeur initiale du facteur de sécurité, l'incrément initial et la méthode de raffinement.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.2.5.1 Opérande FS_INIT

◊ FS_INIT = f0

Cet opérande permet de renseigner la valeur initiale du facteur de sécurité.

Remarque :

1) Il s'agit du coefficient de réduction des propriétés de résistance au cisaillement pour la première itération SRM. Donc, plus cette valeur initiale est proche du facteur de sécurité réel, moins durera le calcul. Cette valeur est souvent obtenue par méthode empirique ou par des tests préalables, mais ne peut jamais dépasser la valeur réelle, sinon le calcul divergera à la première itération SRM et une erreur fatale sera produite. f0 doit être strictement positif et la valeur par défaut est 1,0.

2) A u cas de l'erreur fatale informant que f0 est trop petit, il ne faut pas intuitivement l'augmenter et relancer le calcul SRM. Il est favorable d'examiner dans un premier temps la configuration du calcul non-linéaire, puisqu'il est probable que la divergence du calcul à la première itération SRM est due à la mal configuration du solveur STAT_NON_LINE .

4.2.5.2 Opérande INCR_INIT

◊ INCR_INIT = p0

Cet opérande permet de définir l'incrément initial du facteur de sécurité.

4.2.5.3 Opérande RESI_MAXI

◊ RESI_MAXI = pfin

Cet opérande permet de définir le résidu maximal du facteur de sécurité.

Le facteur de sécurité finalement obtenu est à pfin près de sa valeur réelle. Cet opérande définit donc la précision du calcul de stabilité. Sa valeur par défaut est fixée à 0,01 selon l'habitude du métier hydraulique. L'écart important entre p0 et pfin conduira à une longue durée de calcul si on n'impose pas le nombre de raffinements via le mot-clé ITER_RAFF_LINE .

4.2.5.4 Opérande ITER_MAXI

◊ ITER_MAXI = iter_max

Cet opérande définit le nombre maximal des itérations SRM. Il sert à éviter un calcul inefficace à cause de la configuration inappropriée du mot clé FS. Le calcul s'arrête avec l'erreur fatale si le iter_max est atteint sans que l'algorithme ait convergé.

4.2.5.5 Opérande METHODE

◊ METHODE = /'EXPONENTIELLE'
/'LINEAIRE'

Cet opérande définit la loi de variation de l'incrément du facteur de sécurité. Deux options sont disponibles :

1) 'EXPONENTIELLE' : Variation exponentielle
L'incrément du facteur de sécurité approche le résidu maximal de manière exponentielle. Au n ème raffinement, l'incrément est calculé par :

$$p_n = p_0 2^{-n}$$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

jusqu'à ce que $p_N < p_{fin}$.

2) 'LINEAIRE' : Variation linéaire
L'incrément du facteur de sécurité approche le résidu maximal de manière linéaire. Dans ce cas-là un opérande supplémentaire ITER_RAFF_LINE est nécessaire. Au n[ème] raffinement, l'incrément est calculé par :

$$p_n = p_0 - n\frac{p_0 - p_{fin}}{N}$$

jusqu'à ce que $p_N = p_{fin}$.

L'avantage de la méthode exponentielle est que le calcul converge plus rapidement, alors que la méthode linéaire contrôle mieux la précision du résultat. La variation exponentielle de l'incrément s'adapte surtout au calcul avec grand INCR_INIT.

La méthode suivante simplifierait le choix entre les deux loi de variation de l'incrément. Soit N le nombre de raffinements souhaité, on choisit la loi linéaire si :

$$\frac{p_0 - p_{fin}}{\log_2(p_0) - \log_2(p_{fin})} < N$$

et choisit la loi exponentielle sinon.

4.2.5.6 Opérande ITER_RAFF_LINE

◊ ITER_RAFF_LINE = nbpas

Cet opérande permet de définir le nombre de raffinement de l'incrément si la loi de variation linéaire est sélectionnée.

4.3 Opérande METHODE_STAB = 'LEM'

♦ METHODE_STAB = 'LEM'

En choisissant la méthode LEM , le calcul du facteur de sécurité ne s'appuie plus sur la méthode des éléments finis, néanmoins elle s'appuie toujours sur le maillage en vue de diviser la pente en tranches et de calculer la masse des tranches via l'opérateur POST_ELEM . On fournit donc uniquement les paramètres liés à la division des tranches et à la localisation de la surface de rupture au travers des algorithmes d'optimisation.

4.3.1 Opérande CRITERE

◊ CRITERE = /'MOHR_COULOMB'
/'DRUCK_PRAGER'

Cet opérande permet d'indiquer le critère de rupture à utiliser pour calculer la force de résistance tangentielle. Dans tous les cas on convertit les paramètres du critère Mohr - Coulomb ou Druck er-Prager en l'angle de frottement et cohésion afin de les injecter dans les formulations du calcul du facteur de sécurité suivant la procédure METHODE_LEM sélectionnée.

4.3.2 Opérande GROUP_MA

♦ GROUP_MA = profil_pente

Cet opérande définit le groupe des mailles linéiques représentant le profil de la pente. Il est obligatoire de l'indiquer dans le but de :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Estimation des ordonnées des points d'entrées et de sortie.
- Vérification de la potentielle surface de rupture de sorte qu'elle se situe dans le modèle mais jamais trop proche du profil de la pente.
- Estimation du taux de pente aux extrémités de la surface de rupture afin de déterminer la direction de la force d'interaction entre les tranches.
- Estimation de la hauteur de la pente.

La façon dont le profil de la pente intervient dans les divers algorithmes est expliqué e plus en détail dans [R7.05.02]. L'utilisateur doit s'assurer que le profil de la pente fourni inclut les bandes de recherche des points d'entrée et de sortie, et qu'il satisfait les besoins mentionnés ci-dessus.

I l est conseillé de choisir un profil de la pente qui contient la pente entière ainsi qu'un partie des surfaces aplaties en amont et en aval. Un exemple du profil de la pente est montré dans la Figure 1 .

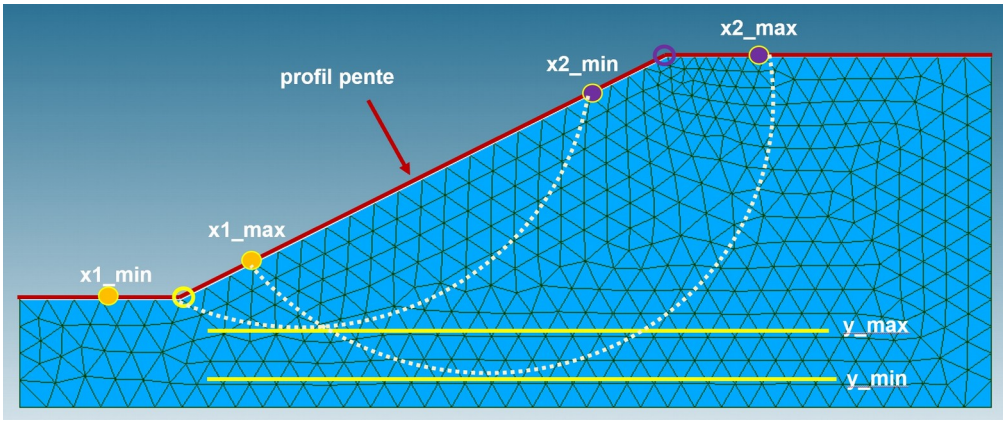


Figure 1: Illustration des paramètres géométriques LEM.

4.3.3 Opérande NB_TRANCHE

```
◊   NB_TRANCHE    =   / 10
                       / Nt
```

Cet opérande définit le nombre des tranches divisant la pente. Il faut remarquer que le calcul LEM sera d'autant plus lent qu'on augmente le nombre des tranches. Cependant, il faut augmenter le nombre des tranches si on analyse la stabilité des structures stratifiées dont la surface de rupture est probablement non-circulaire.

4.3.4 Opérandes X1_MINI, X1_MAXI, X2_MINI et X2_MAXI

```
♦   X1_MINI   =   x1_min
♦   X1_MAXI   =   x1_max
♦   X2_MINI   =   x2_min
♦   X2_MAXI   =   x2_max
```

Ces opérandes définissent les bandes de recherche des abscisses des points d'entrée et de sortie de la potentielle surface de rupture. Par convention, x1_min et x2_min doivent être inférieurs à x1_max et x2_max respectivement. Un exemple de définition des X1 et X2 est montré dans la Figure 1 .

4.3.5 Mot clé RAFF_MAIL

```
RAFF_MAIL = _F(
            ◊   NB_RAFF_MAXI    =   / 4
                                    / N raff
            ◊   RAFF_CRIT_STAB  =   / 1e-3
```


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
                                        / raff_ crit_stab
                    )
```

Mot-clé facteur définissant les paramètres liés à l'algorithme de raffinement du maillage sur le contour des tranches. Le raffinement via la macro-commande MACR_ADAP_MAIL est piloté par le champ de proximité mesurant la distance entre les nœuds et le contour des tranches. La procédure complète est illustrée dans [R7.05.02].

L'opérande NB_RAFF_MAXI définit le nombre maximum de raffinement. Cet opérande permet de limiter le nombre des raffinements afin de pouvoir consulter plus rapidement le résultat de FS en contrepartie de la précision du calcul si le critère de convergence du FS n'est pas satisfait.

L'opérande RAFF_CRIT_STAB définit le critère de stabilisation du facteur de sécurité au cours du raffinement du maillage. L'algorithme s'arrête si la valeur absolue de la variation de FS est inférieure à raff_crit_stab.

4.3.6 Opérande METHODE_LEM = 'BISHOP' ou 'FELLENIUS'

```
◊    METHODE_LEM        =    /'BISHOP'
                             /'FELLENIUS'
```

L'opérande METHODE_LEM permet de basculer entre les différentes procédures de calcul de stabilité par la méthode LEM. Cet opérande détermine en même temps la fonction d'objectif de l'algorithme d'optimisation.

Quand METHODE_LEM = 'BISHOP' ou 'FELLENIUS', on fait l'hypothèse que la surface de rupture est circulaire et on calcule le facteur de sécurité en supposant que les forces d'interaction entre les tranches sont horizontales (BISHOP) ou nulles (FELLENIUS). La surface étant circulaire, on cherche la surface critique en parcourant toutes les combinaisons des points d'entrée et de sortie. Pour chaque combinaison, on calcule automatiquement le rayon minimisant FS. Deux approches sont disponibles pour déterminer les bandes d'essai du rayon :

- **Option 1** : On parcours tous les rayons qui forment une surface de rupture cinématiquement admissible.
- **Option 2** : On définit manuellement la bande d'essai en définissant les droites horizontales tangentielles aux surfaces de rupture. Cette option de recherche accélère le calcul si l'utilisateur expérimenté prévoit une zone réduite où se situe probablement la surface de rupture. On profite de cette option aussi pour examiner les surfaces à l'entourage de celle donnée par le résultat.

Le document [R7.05.02] explique plus en détail l'algorithme d'optimisation pour les procédures Bishop simplifié et Fellenius.

4.3.6.1 Opérandes NB_POINT_1 et NB_POINT_2

```
◊    NB_POINT_1          =    / 5
                              /nb_ point_1
 ◊    NB_POINT_2           =    / 5
                              / nb_ point_2
```

Les opérandes NB_POINT_1 et NB_POINT_2 définissent les nombres des points intermédiaires entre les bandes de recherches des points d'entrée et de sortie respectivement. Par exemple, on teste tous les points x1 :

$$x_1^i = x_{1\,min} + (x_{1\,max} - x_{min})/(N_1 - 1) * i \quad \forall i = 0,1,\ldots,N_1 - 1$$

4.3.6.2 Opérandes Y_MINI et Y_MAXI

```
◊ Y_MINI         =    y_min
```


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

◊ Y_ MAXI = y_ max

Les opérandes Y_MINI et Y_MAXI définissent les ordonnées minimum et maximum des droites horizontales tangentielles aux surfaces de rupture testées. Ces opérandes seront nécessaires si on contrôle manuellement la recherche du rayon (option 2 mentionnée dans la section 4.3.6). Un exemple de configuration des Y_MINI et Y_MAXI est montré dans la Figure 1.

Remarque :

Il faut s'assurer que y_min est inférieur à $min\{x1_{max}, x2_{min}\}$. En effet, si les points d'entrée et de sortie se situent aux deux côtés de la droite tangentielle, cette combinaison sera ignorée puisqu'il sera impossible de créer une surface de rupture tangentielle qui traverse sa ligne tangente.

4.3.7 Opérande METHODE_LEM = 'SPENCER' ou 'MORGENSTERN-PRICE'

```
◊   METHODE_LEM      =   /' SPENCER '
                         /' MOGENSTERN-PRICE '
```

Quand METHODE_LEM = 'SPENCER' ou 'MORGENSTERN-PRICE', on fait l'hypothèse que la surface de rupture est multi-linéaire et calcule le facteur de sécurité en résolvant à la fois le bilan des forces et des moments complets de l'ensemble des tranches. La recherche de la surface critique s'appuie sur l'algorithme de feu-d'artifice renforcé (EFWA) qui fait partie des algorithmes d'essaims intelligentes, et donc requiert des paramètres supplémentaires pour configurer l'algorithme EFWA.

Le document [R7.05.02] explique en détail l'algorithme EFWA.

4.3.7.1 Mot clé ALGO_EFWA

```
ALGO_EFWA = _F(
                ◊   NB_STAB_MAXI    =   / 10
                                        / stab_maxi
                ◊   CRIT_ STAB      =   / 1e- 3
                                        / efwa_resi
                ◊   MARGE_PENTE     =   / 0.1
                                        / marge
            )
```

M ot clé facteur définissant les paramètres liés à l'algorithme d'optimisation EFWA.

```
◊   ETAT_INIT   =   tabfs
```

Cet opérande prend en entrée la table en sortie de la macro-commande CALC_STAB_PENTE , qui permet d'initialiser l'algorithme EFWA en ajoutant à la première génération des feux d'artifice la position de la surface critique issue du calcul précédent.

Cet opérande est utile dans les deux circonstances suivantes :

1) Vu que l'EFWA est un algorithme probabiliste, l'atteinte de l'optimum global n'est pas mathématiquement garantie à l'issu d'un nombre limité d'itérations. Donc CALC_STAB_PENTE offre la possibilité de récupérer le résultat avant l'atteinte du vrai optimum et de reprendre le calcul si nécessaire.

2) Afin de réduire le nombre d'itération, on peut prendre le résultat des procédures conçues pour les surfaces circulaires (Bishop ou Fellenius) comme l'état initial. Cet opérande permet d'introduire une surface circulaire sous la forme d'une table contenant les abscisses des points d'entrée et de sortie et les ordonnées des points intermédiaires. Il faudra donc convertir la sortie Bishop ou Fellenius conformément au format de description de la surface non-circulaire avant de passer à l'EFWA .

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
◊   ITER_MAXI     =       / 1e 2
                          / iter_max
```

L'opérande ITER_MAXI définit le nombre d'itération maximum de l'EFWA. Au bout de iter_max itérations, l'algorithme s'arrête même si la valeur minimale de FS n'a pas encore été obtenue.

```
♦  A      =   a

 ◊   N      =   /5
                /n
 ◊   M      =   /40
                /m
 ◊   MG     =   /5
                /mg
 ◊   SA     =   / 0.04
                / sa
 ◊   SB     =   / 0.8
                / sb
```

Les opérandes A, N, M, MG, SA, SB définissent les paramètres liés à la génération des étincelles ordinaires et gausiennes dans l'EFWA.

La signification de ces opérandes est la suivante :

- L'opérande A : l'amplitude totale de l'explosion des feux d'artifice. Il dépend de la dimension caractéristique de la pente. Par exemple, soit H la hauteur de la pente, il est raisonnable d'estimer approximativement la valeur de A comme :

$$A = \frac{m}{nb_tranches} H$$

- L'opérande N : nombre de feux d'artifice dans chaque génération.
- L'opérande M : nombre total des étincelles ordinaires générées lors de l'explosion de tous les feux d'artifices.
- L'opérande MG : nombre des étincelles gaussiennes générées lors de l'explosion des feux d'artifices. La génération des étincelles gaussiennes a pour enjeu d'améliorer la diversité des étincelles distribuées dans l'espace des variables d'état, ce qui est l'avantage principal de l'EFWA par rapport aux autres algorithmes d'essaims.
- L'opérande SA : coefficient multiplicateur déterminant la limite inférieure du nombre des étincelles générées lors de l'explosion d'un feu d'artifice.
- L'opérande SB : coefficient multiplicateur déterminant la limite supérieure du nombre des étincelles générées lors de l'explosion d'un feu d'artifice.

4.4 Opérande CHAM_DEFO

```
◊   CHAM_DEFO = CO(chamdef)
```

Nom du concept evol_noli contenant le champ visualisant la surface de rupture.

1) Dans le cas où METHODE_STAB = 'SRM' :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Le résultat chamdef contient le champ de déformation plastique cumulée (composant V1 du champ VARI_NOEU) à produire par la macro-commande. Il est possible d'imprimer ce champ via la commande IMPR_RESU à l'issue de l'exécution de la macro-commande pour visualiser la surface de glissement, qui correspond à la zone où la déformation plastique cumulée est importante .

2) Dans le cas où METHODE_STAB = 'LEM' :

Le résultat chamdef contient le champ de déplacement (NOEU_DEPL) indicatif visualisant la partie glissante de la pente. On affecte au composant DX la valeur 1 si le nœud fait partie dans la partie glissante, et 0 sinon.

5 Exemple d'utilisation

L'analyse de stabilité d'un barrage ou d'une digue se déroule en 5 étapes :

1) Définition du modèle et du champ de matériau.
2) Calcul du champ de pression interstitielle par le modèle D_PLAN_H (statique) ou D_PLAN_HH (transitoire).
3) Définition des chargements mécaniques (pression hydrostatique et pesanteur en général).
4) Introduction de la pression hydraulique dans un nouvel champ de matériau via le mot clé facteur AFFE_VARC.
5) Calcul du facteur de stabilité via la macro-commande CALC_STAB_PENTE.

5.1.1 Exemple de calcul avec la méthode SRM

Un exemple d'utilisation pour le calcul statique avec la méthode SRM est montré ci-dessous. Dans le cas test [V1.01.135] se trouvent plus de détails.

```
CMPTOT = AFFE_MATERIAU(AFFE=(_F(GROUP_MA=('fondation', ),
                                MATER=(FOND, )),
                             _F(GROUP_MA=('fond_fill', ),
                                MATER=(ROCK, )),
                             _F(GROUP_MA=('rockfill_down', 'rockfill_up'),
                                MATER=(Remblai, )),
                             _F(GROUP_MA=('core', ),
                                MATER=(CLAY, ))),
                             AFFE_VARC=_F(EVOL=REPTOT,
                                          NOM_VARC='PTOT',
                                          TOUT='OUI'),
                             MAILLAGE=MAILME)

TABFOS = CALC_STAB_PENTE(MODELE = modME,
                         CHAM_MATER = CMPTOT,
                         GROUP_MA = ('ZONE_SRM',),
                         EXCIT=(_F(CHARGE=DIRI),
                                        _F(CHARGE=Gravity,
                                           FONC_MULT=multi),
                                        _F(CHARGE=Presrep,
                                           FONC_MULT=multi)),
                         INCREMENT=_F(LIST_INST=LT),
                         CONVERGENCE=_F(ITER_GLOB_MAXI=50),
                         COMPORTEMENT=_F(RELATION='MOHR_COULOMB'),
                         FS = _F(FS_INIT = 1.2,
                                 INCR_INIT = 0.4,
                                 RESI_MAXI = 0.02,
                                 ),
                         CHAM_DEFO = CO('chamdef'),
                         )
```


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
IMPR_TABLE(TABLE=TABFOS, UNITE=8)

IMPR_RESU(RESU = _F(RESULTAT = chamdef), UNITE= 2)
```

L e calcul hydraulique transitoire permet d'évaluer la stabilité d'un ouvrage hydraulique en remblai sous d es chargements transitoires, tels que l'inondation pour les digues et l e vidange rapide du réservoir pour les barrages en remblai. La macro-commande CALC_STAB_PENTE n'est néanmoins pas capable de tra iter directement les chargements transitoire s, à l'exception des chargements quasi-statiques avec fonction multiplicatrice qui sert à améliorer la convergence du calcul.

Cependant, l'évaluation de la stabilité de l'ouvrage sous chargement hydraulique transitoire peut s'effectuer possiblement avec CALC_STAB_PENTE en vérifiant, à chaque pas de calcul transitoire, la stabilité statique de l'ouvrage. Avec cette méthode on obtiendra les tables comme résultat dont le nombre total est égal au nombre des instants physiques. Il est donc possible de tracer la variation du facteur de sécurité en fonction du temps.

5.1.2 Exemple de calcul avec la méthode LEM

Un exemple d'utilisation pour l'analyse de stabilité par la méthode Bishop simplifiée est montré ci-dessous.

```
TABFS = CALC_STAB_PENTE(CHAM_MATER = CHMAT1,
                        METHODE_STAB = 'LEM',
                        METHODE_LEM = 'BISHOP',
                        CRITERE = 'DRUCK_PRAGER',
                        GROUP_MA = ('range_pente',),
                        NB_TRANCHE = 5,
                        RAFF_MAIL = _F(NB_RAFF_MAXI = 1),
                        X1_MINI = 3.,
                        X1_MAXI = 3.,
                        X2_MINI = 13.2,
                        X2_MAXI = 13.2,
                        NB_POINT_1 = 1,
                        NB_POINT_2 = 1,
                        Y_MINI = 1.2,
                        Y_MAXI = 1.6,
                        CHAM_DEFO = CO('chamdef'),
                        )
```

Un exemple d'utilisation pour l'analyse de stabilité par la méthode Morgenstern-Price est montré ci-dessous.

```
TABFS = CALC_STAB_PENTE(CHAM_MATER = CHMAT1,
                        METHODE_STAB = 'LEM',
                        METHODE_LEM = 'MORGENSTERN_PRICE',
                        CRITERE = 'MOHR_COULOMB',
                        GROUP_MA = ('range_pente',),
                        NB_TRANCHE = 5,
                        RAFF_MAIL = _F(NB_RAFF_MAXI = 1),
                        X1_MINI = 3.,
                        X1_MAXI = 3.,
                        X2_MINI = 13.2,
                        X2_MAXI = 13.2,
                        ALGO_EFWA = _F(ETAT_INIT = TAB_INIT,   MARGE_PENTE =
0.8),
                        CHAM_DEFO = CO('chamdef'),
                        )
```


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Plus de détails se trouvent dans le cas-test [V1.01.146].

6 Bibliographie

1. D. V. GRIFFITHS , and P. A. LANE ., Slope Stability Analysis By Finite Elements ., Geotechnique, 49 (1999): 387-403.
2. Duncan J. M., Wright S. G., Brandon T. L., Soil Strength and Slope Stability 2n Edition, 2014

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)