



**POLYTECH<sup>®</sup>**  
GRENOBLE

**GEOTECHNIQUE GENIE CIVIL**

**4<sup>ème</sup> année**

## ***Cours d'ingénierie des roches***

***Didier Hantz***

### ***Chapitre 1. Stabilité des massifs fracturés***



# Ingénierie des roches

## Objectifs, compétences visées

A l'issue de ce cours, les élèves doivent maîtriser les principales méthodes d'analyse du comportement mécanique des massifs rocheux, à l'état naturel ou dans un contexte de travaux d'aménagement (mouvements de terrain naturels, déformations tectoniques, ouvrages souterrains, excavations de surface, fondations). Ils doivent être capables d'évaluer la stabilité des excavations ou des fondations et de prévoir leur déformation.

## Pré-requis

Bases de mécanique des roches

## Plan du cours

1. Stabilité des massifs fracturés
  - 1.1. Méthodes d'équilibre limite (théorie des blocs, stabilité au glissement, stabilité au basculement)
  - 1.2. Méthodes d'éléments discrets
2. Excavations dans un massif continu
  - 2.1. Forages et galeries
  - 2.2. Excavations en surface, rebond élastique
3. Mesures in situ dans les massifs rocheux
  - 3.1. Déformabilité et résistance du massif rocheux
  - 3.2. Variations de contraintes
  - 3.3. Etat de contrainte
4. Dimensionnement des ouvrages, utilisation de l'Eurocode 7

*Remarques : le dimensionnement des ouvrages souterrains, le risque rocheux et le renforcement des massifs rocheux sont l'objet de modules de 5<sup>ème</sup> année ; la modélisation des ouvrages géotechniques par éléments finis est l'objet d'un cours et de TD en 4<sup>ème</sup> année.*

## Bibliographie

- CFMR (Comité Français de Mécanique des Roches). Manuel de mécanique des roches, tome 2 : Applications, 460 pages, Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 2004.
- FRANKLIN J.A. et DUSSEAULT M.B. Rock Engineering, 600 pages, McGraw-Hill, 1989.
- GOODMAN R.E. Introduction to Rock Mechanics, 562 pages, Wiley, 1989.
- HOEK E. et BRAY Rock Slope Engineering.
- HOEK E. et BROWN, E.T. Underground Excavations in Rock, 527 pages, The Institution of Mining and Metallurgy, Londres, 1980.
- VULLIET L., LALOUI L., ZHAO J. Mécanique des sols et des roches, 624 pages. Traité de génie civil, volume 18, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2016.
- WYLLIE D.C. Rock Slope Engineering, Civil Applications. CRC Press, 2018.

### **A télécharger gratuitement**

HOEK E. Practical Rock Engineering.

[http://www.rocscience.com/education/hoeks\\_corner](http://www.rocscience.com/education/hoeks_corner)

**GEOTECHNIQUE GENIE CIVIL**

**4<sup>ème</sup> année**

*Cours d'ingénierie des roches*

*Chapitre 1*

## **Stabilité des massifs fracturés**

*Première partie*

### **Méthodes d'équilibre limite**

*(texte et diapositives)*

1. Introduction à la théorie des blocs
2. Identification des blocs amovibles
3. Détermination des modes d'instabilité potentiels
4. Stabilité d'un bloc au glissement
5. Stabilité d'un bloc au basculement (renversement)
6. Stabilité d'un ensemble de blocs

*Deuxième partie*

### **Méthodes d'éléments discrets**

*(diapositives)*

Dans le premier chapitre de ce cours d'ingénierie des roches, on étudie la stabilité des blocs rocheux définis par les discontinuités naturelles du massif. Par la suite, on traitera des instabilités dues à la rupture du matériau rocheux. Il existe deux familles de méthodes pour étudier la stabilité des massifs constitués de blocs : les méthodes d'équilibre limite (MEL) et les méthodes d'éléments discrets (MED). Les premières ont pour but de vérifier si l'équilibre des blocs est réalisé, en utilisant la première loi de Newton (principe fondamental de la statique). Les blocs sont supposés parfaitement rigides et les discontinuités rigides-plastiques (avec des critères de rupture en cisaillement et en traction). Les méthodes d'éléments discrets permettent de calculer les mouvements des blocs en utilisant la seconde loi de Newton (principe fondamental de la dynamique). Les blocs peuvent être rigides ou déformables et les discontinuités ont un comportement élasto-plastique.

## 1. INTRODUCTION A LA THEORIE DES BLOCS

### 1.1. OBJECTIF

Dans les massifs rocheux fracturés, de nombreuses ruptures complexes sont déclenchées par le mouvement d'un simple bloc (le bloc clé) défini par des discontinuités préexistantes. Dans certains cas, le danger potentiel est représenté par un seul bloc, de taille importante (exemple de Malpasset). Il suffit donc de le stabiliser pour empêcher la rupture. Goodman et Shi ont proposé une théorie permettant de déterminer les blocs clés pour n'importe quel type de surface rocheuse (talus, cavité souterraine, surface naturelle) et pour des forces actives quelconques. Cette théorie du bloc clé est présentée dans ce chapitre, ainsi que la méthode d'analyse de stabilité à l'équilibre limite. De plus, quelques mécanismes de rupture fréquents, faisant intervenir des interactions entre blocs, sont analysés.

### 1.2. MODELISATION DU MASSIF ROCHEUX

Le massif rocheux est délimité par des surfaces libres planes (plans d'excavation) et découpé en blocs par des discontinuités planes fermées (joints) d'extension infinie. Les joints sont répartis en familles de plans parallèles. La situation de ces plans dans l'espace n'est généralement pas connue.

Un plan d'excavation délimite 2 demi-espaces : un demi-espace vide et un demi-espace rocheux. Un joint délimite 2 demi-espaces rocheux, notés 0 et 1 (0 pour celui qui est au-dessous, 1 pour celui qui est au-dessus).

La matrice rocheuse est supposée suffisamment résistante pour qu'il n'y ait pas de rupture des blocs.

### 1.3. METHODOLOGIE

La méthode proposée peut être décomposée en trois phases (figure 1.1).

La première consiste à identifier les blocs amovibles (ou déplaçables), c'est à dire les blocs pouvant être déplacés par rapport au massif. Pour une surface d'excavation donnée (constituée d'un ou plusieurs plans), ces blocs sont définis par rapport aux familles de joints qui les délimitent. Pour cette étape, seules des données géométriques sont nécessaires.

La deuxième phase consiste à déterminer les blocs potentiellement instables, c'est à dire ceux qui peuvent géométriquement se déplacer sous l'effet d'une force active donnée, ainsi que les modes d'instabilité correspondant. La connaissance de la résultante des forces actives s'exerçant sur les blocs amovibles est nécessaire. D'autres forces que les poids propres des blocs doivent éventuellement être considérées (forces hydrostatiques notamment).

Finalement, l'analyse de stabilité permet de déterminer les blocs effectivement instables. Elle tient compte des résistances au cisaillement des discontinuités sur lesquelles un glissement potentiel a été identifié. Cette analyse permet aussi de calculer la force nécessaire pour stabiliser les blocs instables.

## 1.4. OUTILS DE LA THEORIE DES BLOCS

L'identification des blocs amovibles et la détermination de leurs modes d'instabilité nécessite de définir précisément l'ensemble des directions possibles de déplacement d'un bloc. Pour cela, Goodman et Shi ont introduit les notions de pyramide de joints et de pyramide d'excavation (figure 2.1). Ces pyramides (définies dans un espace vectoriel) représentent des ensembles de directions limitées par un ou plusieurs plans. Elles sont obtenues en translatant les plans de joint ou d'excavation pour les faire passer par un même point et peuvent être représentées en projection stéréographique.

### 1.4.1. Pyramide d'excavation

La pyramide d'excavation associée à une surface rocheuse convexe (PE) est l'intersection des demi-espaces rocheux définis par les plans d'excavation (ces derniers sont inclus dans la PE). Elle représente l'ensemble des directions non affleurantes issues d'un point quelconque du massif (c'est à dire l'ensemble des directions qui ne recoupent pas la surface libre). La notion de pyramide d'excavation est illustrée dans un espace à deux dimensions sur la figure 2.1. Remarque : l'origine du repère de l'espace vectoriel ne représente pas une direction et n'appartient donc pas à la pyramide d'excavation.

### 1.4.2. Pyramide des joints

Les familles de discontinuités du massif rocheux définissent, dans l'espace vectoriel, des pyramides appelées pyramides de joints (PJ). Ces pyramides deviennent des dièdres s'il n'y a que deux familles, et des demi-espaces s'il n'y en a qu'une. Pour distinguer les deux demi-espaces définis par une famille non verticale, on notera 0 pour le demi-espace inférieur et 1 pour le demi-espace supérieur (remarque : cette notation est inverse de celle utilisée par Goodman et Shi, mais elle est plus logique car  $0 < 1$ ). Les 4 PJ définies par deux familles sont notées 00, 01, 10 et 11. Un bloc correspondant à la PJ 01 est donc limité vers le haut par un joint de la famille n°1 et vers le bas par un joint de la famille n°2. En général, trois familles de joints définissent 8 PJ, notées 000, 001, 010.

La pyramide de joints associée à un bloc (PJ) est l'intersection des demi-espaces intérieurs au bloc, définis par les joints délimitant ce bloc (ces derniers sont inclus dans la PJ). Un bloc fini comportant une seule face libre a donc une PJ délimitée par au moins 3 plans. Un bloc comportant 2 faces libres a une PJ délimitée par au moins 2 plans. La PJ d'un bloc représente l'ensemble des directions issues d'un point quelconque du bloc, qui n'intersectent aucun plan de joint. Autrement dit, elle représente l'ensemble des directions de mouvement possibles du bloc, par glissement ou ouverture des joints.

## 2. IDENTIFICATION DES BLOCS AMOVIBLES

### 2.1. THEOREME DE SHI

Une pyramide de joints (PJ) et une pyramide d'excavation (PE) définissent une famille de blocs, ayant la même forme mais des tailles différentes. Ces blocs sont amovibles si les deux conditions suivantes sont remplies :

- $PJ \cap PE = \emptyset$
- $PJ \neq \emptyset$

La première condition signifie que ces blocs sont finis. En effet, s'il existait une direction issue d'un point quelconque d'un bloc, qui n'intersecte pas les joints ( $\in PJ$ ) ni la surface libre ( $\in PE$ ), ce bloc serait infini, donc non amovible.

La seconde condition signifie que les blocs ne sont pas enfermés par des joints, c'est à dire qu'un mouvement serait possible par ouverture ou cisaillement de ceux-ci. La PJ représente donc l'ensemble des directions de mouvement possibles pour ce bloc (il ne peut pas y avoir fermeture des joints). En pratique, cette condition est remplie pour toute PJ représentée sur un stéréogramme.

Il peut exister plusieurs PJ telles que  $PJ \cap PE = \emptyset$ . La réunion de plusieurs PJ adjacentes (c'est-à-dire qui ont un joint en commun) définit de nouveaux types de blocs, qui doivent être considérés dans l'analyse de

stabilité, en plus des types définis par chaque PJ. Ces nouveaux blocs déterminent le plus gros volume amovible, mais pas forcément le plus critique. La réunion de 2 PJ adjacentes ayant en commun un joint  $i$  est désignée en affectant le chiffre 2 au joint  $i$ . Par exemple, la réunion des PJ 110 et 111 donne la PJ 112, qui est identique à la PJ 11 obtenue si on ne considère pas la 3<sup>o</sup> famille de joints.

### **Blocs à faces parallèles**

*Les pyramides de joints, telles que définies jusqu'ici, permettent d'identifier des blocs amovibles, dont le déplacement implique l'ouverture d'au moins un des joints qui les délimitent. Mais certains blocs amovibles ne peuvent pas être détectés de cette manière. Il s'agit des blocs comportant deux faces parallèles, qui ne peuvent bouger que parallèlement à celles-ci. Leur mouvement est généralement plus difficile que celui des autres blocs, car la contrainte normale aux deux faces parallèles augmente avec le déplacement si les joints sont dilatants, ce qui a pour effet d'augmenter la résistance au cisaillement. Pour les détecter, il faut appliquer le théorème de Shi aux facettes qui délimitent les PJ, qui sont en fait des PJ bidimensionnelles. Ainsi la facette qui délimite les PJ 000 et 010 est appelée la PJ 030.*

### **Blocs cylindriques ou quasi-cylindriques**

*Si l'intersection d'une PJ avec la PE se réduit à une droite ou un plan, il n'y a théoriquement pas de bloc amovible, mais la PJ définit des blocs cylindriques infinis parallèles à la surface libre. Dans le cas d'une galerie ou d'un talus de grande longueur, il est peu probable, en pratique, qu'il n'existe pas de discontinuités découpant ces blocs en blocs amovibles. De plus, si la longueur est suffisante, les contraintes de cisaillement aux extrémités peuvent provoquer la rupture de la matrice rocheuse. Cela est vrai également si  $PJ \cap PE$  représente un angle solide très petit, c'est à dire une surface réduite sur la projection stéréographique (blocs infinis quasi-cylindriques). Pour un talus rectiligne comportant une seule famille de joints de même azimut et de pendage conforme et inférieur à la pente du talus, on considère généralement qu'un glissement peut se produire si les azimuts des joints et du talus diffèrent de moins de 20°.*

## **2.2. VOLUME DES BLOCS**

Dans l'analyse de stabilité, il peut être nécessaire de connaître le volume des blocs clés. Lorsque l'on étudie un projet d'excavation, on connaît généralement l'orientation des familles de joints, mais pas la position des joints. On considère alors l'hypothèse la plus défavorable, qui consiste à supposer que les joints sont placés de manière à découper les plus gros blocs possibles. Les volumes maxima sont déterminés à partir des dimensions de la surface libre (hauteur d'une paroi, largeur d'une cavité, ...) et des orientations des joints: les angles des faces des blocs peuvent être mesurés sur un stéréogramme et reportés sur un dessin à l'échelle, sur lequel les dimensions manquantes peuvent être déterminées. Le volume  $V$  d'une pyramide est donné par la formule:

$$V = BH / 3$$

H étant la hauteur et B la surface de base.

## **2.3. CAS DES SURFACES ROCHEUSES CONCAVES**

Le théorème de Shi ne s'applique pas aux surfaces rocheuses concaves. Pour identifier les blocs amovibles, celles-ci doivent être décomposées en parties planes (Figure 2.2). Mais pour définir le plus gros bloc, il faut considérer la surface concave dans son ensemble.

*Explication : dans le cas d'une surface libre concave, la PE est la réunion des demi-espaces rocheux définis par les plans d'excavation. Une pyramide de joints peut donc remplir les conditions de Shi pour un plan d'excavation seul, mais pas si on lui adjoint un second plan en formant une surface concave. Au contraire, le fait d'ajouter un second plan en formant une surface convexe peut rendre critique de nouvelles pyramides de joints. Il faut donc étudier les surfaces rocheuses convexes sans les décomposer en parties planes.*

*La voûte d'un tunnel pourrait être modélisée par un grand nombre d'éléments plans. Il faudrait alors déterminer les PJ définissant des blocs amovibles pour chaque élément, puis diviser la voûte en parties correspondant à une même PJ, et enfin déterminer les blocs les plus gros pour chaque partie. En pratique,*



on recherche directement les parties de la voûte qui peuvent donner des blocs amovibles avec les différentes pyramides de joints. Pour cela, on examine successivement les PJ qui ne contiennent pas l'axe du tunnel (ces dernières ont nécessairement une intersection avec toutes les PE), et on cherche les PE les plus grandes qui les contiennent. Dans le cas général, ces PE sont limitées par des arêtes de PJ.

## 2.4. EXEMPLES

Massif découpé par 3 familles de joints

- a. Sol horizontal
- b. Toit d'une cavité souterraine
- c. Parois verticales d'une cavité
- d. Talus et surface horizontale

Remarque

Dans le cas d'un massif limité par un talus et une surface horizontale, il est possible de n'utiliser que l'intérieur du cercle de référence pour déterminer la PJ (ou la réunion de plusieurs PJ) définissant le volume instable maximal.

## 3. DETERMINATION DES MODES D'INSTABILITE POTENTIELS

### 3.1. MODES D'INSTABILITE

Un bloc peut se mettre en mouvement par translation ou par rotation (ou basculement).

Les mouvements translationnels se répartissent en trois modes.

- Le décollement: tous les joints délimitant le bloc s'ouvrent.
- Le glissement sur un plan: le bloc glisse sur un seul des joints qui le délimitent, les autres joints s'ouvrent.
- Le glissement sur deux plans (ou glissement dièdre): le bloc glisse sur deux des joints qui le délimitent, les autres joints s'ouvrent.

La méthode présentée au paragraphe 3.2 permet de déterminer lequel de ces modes d'instabilité risque d'affecter un bloc amovible défini par une PJ.

Le mode d'instabilité par basculement est analysé au paragraphe 3.4.

### 3.2. MODES D'INSTABILITE PAR TRANSLATION

Notations.

- $\mathbf{n}_i$  : vecteur unitaire normal au joint  $i$ , dirigé vers l'extérieur du bloc étudié (ne doit donc pas appartenir à la pyramide de joint)
- $\mathbf{w}_{ij}$  : vecteur unitaire de l'intersection des 2 joints  $i$  et  $j$  d'une pyramide de joints, dirigé dans le sens où le mouvement du bloc est possible ( $\mathbf{w}_{ij} \in \text{PJ}$ ).

Remarque: si la PJ d'un bloc amovible n'est délimitée que par 2 plans, le mouvement est possible dans les 2 directions de l'intersection, notée  $\mathbf{w}_{ij}^+$  (vers le haut) et  $\mathbf{w}_{ij}^-$  (vers le bas).

- $\mathbf{R}$  : résultante des forces actives s'exerçant sur le bloc
- $\mathbf{R}_i$  : projection de  $\mathbf{R}$  sur le plan  $i$  (si  $\mathbf{R}$  est le poids du bloc,  $\mathbf{R}_i$  suit la ligne de plus grande pente du plan  $i$ )
- $\mathbf{s}$  : vecteur unitaire de la direction du mouvement ( $\mathbf{s}$  appartient nécessairement à la PJ)

*Remarque:* en projection de l'hémisphère inférieur (foyer supérieur), la direction verticale ascendante est rejetée à l'infini. Une pyramide qui la contient est représentée par un domaine infini situé à l'extérieur d'un triangle curviligne.

### 3.2.1. Décollement

La condition nécessaire et suffisante pour que le mode d'instabilité potentiel soit le décollement est:

$$\mathbf{R} \in \text{PJ}$$

Cela signifie que  $\mathbf{R}$  tend à ouvrir tous les joints délimitant le bloc. La direction du mouvement potentiel est alors celle de  $\mathbf{R}$ .

*Remarque:* si  $\mathbf{R}$  appartient à un ou plusieurs des joints qui délimitent la PJ, il n'y a pas décollement au sens stricte, mais glissement sans frottement sur ces joints.

### 3.2.2. Glissement sur un plan

La condition nécessaire et suffisante pour que le mode d'instabilité potentiel soit le glissement sur le joint  $i$  est:

$$\mathbf{R} \in (\mathbf{w}_{ij}, \mathbf{w}_{ik}, \mathbf{n}_i)$$

ou:  $\mathbf{R} \notin$  au demi-espace côté PJ, défini par le joint  $i$ , et  $\mathbf{R}_i \in \text{PJ}$

Cela signifie, d'une part, que  $\mathbf{R}$  tend à fermer le joint  $i$ , d'autre part, que  $\mathbf{R}_i$  est compris entre les intersections  $\mathbf{w}_{ij}$  et  $\mathbf{w}_{ik}$  (le glissement dans la direction  $\mathbf{R}_i$  n'est pas "dévié" par un autre plan). La direction du mouvement potentiel est alors celle de  $\mathbf{R}_i$ .

*Remarque 1:* lorsque la PJ est définie par seulement 2 joints (cas d'un dièdre), le domaine  $(\mathbf{w}_{ij}, \mathbf{w}_{ik}, \mathbf{n}_i)$  devient un dièdre droit délimité par le demi-plan  $(\mathbf{w}_{ij}^+, \mathbf{n}_i, \mathbf{w}_{ij}^-)$  et le demi-plan  $i$  qui délimite la PJ (voir figure 4.1).

*Remarque 2:* si la seule force active est le poids du bloc amovible,  $\mathbf{R}_i$  est parallèle au vecteur pendage (ou à la ligne de plus grande pente) du plan  $i$ . Il suffit alors de regarder si celui-ci appartient à la PJ.

### 3.2.3. Glissement sur deux plans

La condition nécessaire et suffisante pour que le mode d'instabilité potentiel soit le glissement sur les joints  $i$  et  $j$  (dans la direction  $\mathbf{w}_{ij}$ ) est:

$$\mathbf{R} \in (\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j, \mathbf{w}_{ij})$$

*Remarque:* lorsque la PJ est définie par seulement 2 joints (cas d'un dièdre), le glissement sur ces joints peut se faire dans deux directions opposées, correspondant aux deux trièdres  $(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j, \mathbf{w}_{ij}^+)$  et  $(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j, \mathbf{w}_{ij}^-)$ .

### 3.2.4. Stabilité

Si  $\mathbf{R}$  n'appartient à aucun des domaines définis précédemment, le bloc est stable.  $\mathbf{R}$  tend à fermer tous les joints délimitant le bloc.

### 3.2.5. Remarques pratiques

En pratique, on n'envisage pas toutes les directions possibles pour la force  $\mathbf{R}$ . Il n'est donc pas nécessaire de déterminer les domaines correspondant à tous les modes d'instabilité possibles. Si la direction de la force résultante  $\mathbf{R}$  est connue de manière certaine (par exemple, si on ne considère que le poids des blocs), il suffit de trouver dans quel domaine elle se situe. Si elle n'est pas connue de manière certaine, on effectue une étude paramétrique en envisageant l'ensemble des directions vraisemblables.

Dans les cas simples, le mode d'instabilité peut être déterminé intuitivement en visualisant la géométrie des blocs (mentalement ou à l'aide d'un schéma). Il peut être ensuite vérifié en utilisant les conditions données ci-dessus.

Dans le cas simple d'un bloc découpé par deux joints dans un talus et soumis seulement à son poids, le mode d'instabilité est le glissement sur un plan si l'un des vecteurs pendage des joints appartient à la PJ.

## 3.3. EXEMPLES

Surface libre horizontale

Talus

### 3.4. INSTABILITE PAR BASCULEMENT (RENVERSEMENT)

La condition suffisante pour que le basculement d'un bloc amovible soit possible est que la demi-droite portant la résultante des forces actives intersecte une face libre du bloc, mais n'appartienne pas à la pyramide de joints définissant le bloc.

En effet, dans ce cas, la réaction exercée par le massif ne peut pas être portée par la même droite que la résultante et le bloc est soumis à un moment résultant, qui a tendance à le faire basculer ; pour qu'il reste en équilibre, il faut que les joints qui le délimitent exercent un moment résistant en mobilisant leur résistance en traction ou cisaillement ; si les joints ont une cohésion nulle (donc une résistance en traction nulle également), il y a basculement.

Dans le cas simple d'un bloc parallélépipède reposant sur un plan incliné d'un angle  $\alpha$  et soumis à son seul poids, la condition de basculement potentiel est :

$$Y/X > \cot\alpha$$

Y étant la hauteur du bloc et X son épaisseur.

## 4. STABILITE D'UN BLOC AU GLISSEMENT

### 4.1. INTRODUCTION

#### 4.1.1. La méthode de l'équilibre limite

La méthode de l'équilibre limite consiste à écrire les équations d'équilibre d'un bloc (ou de plusieurs), en exprimant les forces de réaction résistant au cisaillement comme une fraction  $1/F$  (inconnue) de la résistance maximale mobilisable. Le coefficient  $F$  (appelé coefficient de sécurité) est donc le rapport de cette résistance mobilisable sur la force résistante nécessaire à l'équilibre limite. Cette dernière est égale à la force active de cisaillement (appelée aussi force motrice) qui tend à provoquer le mouvement. Dans le cas simple du glissement translationnel d'un seul bloc, le coefficient de sécurité est défini par :

$$F = \text{force résistante mobilisable} / \text{force résistante nécessaire}$$

ou

$$F = \text{force résistante mobilisable} / \text{force motrice}$$

Si  $F$  est supérieur à 1, cela signifie que la résistance maximale n'est mobilisée que dans une proportion  $1/F$ , et que le bloc est stable. Si  $F$  est inférieur à 1, cela signifie que la résistance est insuffisante pour assurer l'équilibre du bloc (il faudrait la multiplier par  $1/F$ ). Le coefficient de sécurité permet donc de quantifier le degré de stabilité.

#### Remarques

Dans le cas où plusieurs blocs sont impliqués,  $F$  est une des inconnues d'un système d'équations comportant les équations d'équilibre et les critères de rupture des joints.

Cette méthode est basée sur un modèle de blocs rigides et de joints rigides-plastiques (parfaitement plastiques ou avec chute de résistance), caractérisés par un critère de résistance au cisaillement (Coulomb, Barton, ...). Lorsque plusieurs joints sont sollicités en cisaillement, elle suppose donc que leurs résistances peuvent être mobilisées simultanément. Ce n'est pas forcément le cas, car les joints ont en réalité un comportement élasto-plastique, caractérisé par un critère de résistance au cisaillement et une raideur tangentielle. Il en résulte que pour un déplacement donné, certains joints peuvent avoir atteint leur résistance maximale alors que d'autres ne l'ont pas encore atteinte.

#### 4.1.2. Notations (figures 4.1 et 4.3)

**R** : résultante des forces actives s'exerçant sur le bloc étudié (c'est en général une donnée du problème)

**R<sub>t</sub>** : composante de **R** dans la direction de glissement potentiel (force active de cisaillement) ;  $R_t = R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{s})$ , avec  $\mathbf{s} // \mathbf{R}_i$  ou  $\mathbf{s} // \mathbf{w}_{ij}$

**R<sub>n</sub>** : composante de **R** normale à la direction de glissement potentiel ;  $R_n = R \sin(\mathbf{R}, \mathbf{s})$

**R<sub>ni</sub>** : composante de **R<sub>n</sub>** sur la normale au plan  $i$

**T** : réaction parallèle à la direction de glissement potentielle (force résistante au cisaillement, opposée à **R<sub>t</sub>**)

$N_i$  : réaction normale au plan  $i$  (opposée à  $R_{ni}$ )

#### 4.1.3. Hypothèses

La réaction normale  $N_i$  n'a pas de limite (le bloc ne peut pas s'enfoncer dans le massif), donc :  $N_i = R_{ni}$

La réaction  $T$  est limitée par les résistances au cisaillement des plans de glissement potentiels.

$$T \leq T_{\max}$$

Si ces résistances obéissent au critère de Coulomb :

$$T_{\max} = \sum (N_i \operatorname{tg}\Phi_i + c_i A_i)$$

$\Phi_i, c_i$  : angle de frottement et cohésion du plan  $i$

$A_i$  : aire de la surface de glissement sur le plan  $i$

Aire d'un triangle dont les côtés ont des longueurs  $a, b$  et  $c$ , et les angles opposés à ces côtés valent respectivement  $\alpha, \beta$  et  $\gamma$  :  $A = (a b \sin\gamma) / 2$

#### 4.1.4. Condition de stabilité

Si  $R_t < T_{\max}$ ,  $T = R_t$ ; le bloc est stable.

Si  $R_t = T_{\max}$ ,  $T = R_t = T_{\max}$ ; le bloc est en équilibre limite.

Si  $R_t > T_{\max}$ ,  $T = T_{\max}$ ; le bloc se met en mouvement. Tant que le bloc glisse sur le ou les même(s) plan(s), l'équation du mouvement est :

$$M x'' = R_t - T_{\text{dyn}}$$

avec  $M$  : masse du bloc;

$x''$  : accélération;

$T_{\text{dyn}}$  : résistance dynamique au cisaillement,  $T_{\text{dyn}} = \sum N_i \operatorname{tg}\Phi_{\text{dyn}i}$

L'angle de frottement dynamique  $\Phi_{\text{dyn}}$  est inférieur à l'angle de frottement statique  $\Phi$ .

#### 4.1.5. Quantification de la stabilité

On utilise le plus souvent le coefficient de sécurité  $F$ , défini par :  $F = T_{\max} / R_t$  (rapport de la force résistante maximale mobilisable à la force motrice).

Un bloc est stable si son coefficient de sécurité est supérieur à 1.

## 4.2. GLISSEMENT SUR UN PLAN $i$

#### 4.2.1. Cas général (figure 4.1)

$$R_t = R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{R}_i) = R \sin(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)$$

$$R_{ni} = R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i) = N_i$$

$$T_{\max} = R_{ni} \tan\Phi_i + c_i A_i$$

$$F = T_{\max} / R_t$$

En explicitant, on obtient :

$$F = \frac{R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i) \tan\phi_i + c_i A_i}{R \sin(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)} = \frac{\tan\phi_i}{\tan(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)} + \frac{c_i A_i}{R \sin(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)}$$

$$\text{Si la cohésion est nulle : } F = \frac{\tan\phi_i}{\tan(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)}$$

Il s'ensuit que la condition de stabilité ( $F > 1$ ) s'écrit :  $(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i) < \phi_i$ . Cela signifie que la résultante  $\mathbf{R}$  doit être située dans un cône d'axe  $\mathbf{n}_i$  et d'angle  $\Phi_i$  (cône de frottement). La représentation stéréographique de ce cône et de la résultante des forces actives permet une analyse graphique de la stabilité, ainsi que le calcul du coefficient de sécurité.

#### 4.2.2. Glissement dû au seul poids du bloc (figure 4.2)

Si  $\mathbf{W}$  est le poids du bloc,  $\mathbf{R} = \mathbf{W}$ .

$(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)$  est égal au pendage  $\psi_i$  du plan de glissement.

$$F = \frac{W \cos \psi_i \tan \phi_i + c_i A_i}{W \sin \psi_i} = \frac{\tan \phi_i}{\tan \psi_i} + \frac{c_i A_i}{W \sin \psi_i}$$

Si la cohésion du plan de glissement est nulle,

$$F = \frac{\tan \phi_i}{\tan \psi_i}$$

Si la résistance au cisaillement obéit au critère linéaire de Coulomb ( $\phi_i$  indépendant de  $N_i$ ), le coefficient de sécurité ne dépend pas du poids du bloc.

#### 4.2.3. Glissement dû au poids et aux forces hydrauliques

La force  $\mathbf{V}$  résultant des pressions interstitielles s'exerçant sur une surface de glissement, lui est perpendiculaire et diminue l'effort normal sur celle-ci et, par conséquent, sa résistance au cisaillement. Dans les études de dimensionnement de talus, on admet généralement que celui-ci est drainé et que la pression est nulle à l'intersection d'un plan de glissement et du talus. On admet également que la conductivité hydraulique du plan de glissement est constante, ce qui implique que la charge hydraulique, et donc la pression, varie linéairement le long de celui-ci. La force  $\mathbf{V}$  est alors donnée par le produit de la pression moyenne par la surface du plan de glissement.

De plus, on considère souvent que le bloc amovible est limité, en amont, par une fracture verticale ouverte, susceptible de se remplir d'eau sur une certaine hauteur  $h_w$ . La pression dans celle-ci augmente linéairement avec la hauteur d'eau, pour atteindre la valeur maximale:

$$u_{\max} = \gamma_w h_w$$

La force  $\mathbf{U}$  résultant de cette pression se décompose en une composante motrice, dans la direction du mouvement potentiel, et une composante normale, qui diminue l'effort normal sur le plan de glissement.

#### 4.2.4. Problème plan

Lorsque le bloc susceptible de glisser a une forme prismatique et que les forces actives sont perpendiculaires à l'axe du prisme, l'analyse peut se faire en plan, en considérant une tranche de 1 m d'épaisseur.

Les forces hydrauliques  $\mathbf{U}$  et  $\mathbf{V}$  sont alors données par les expressions :

$$U = \gamma_w h_w^2 / 2 \text{ et } V = \gamma_w h_w L / 2$$

où  $L$  est la longueur du plan de glissement.

#### 4.2.5. Surface de glissement avec pont rocheux

Il arrive que le plan de glissement potentiel comporte des ponts rocheux, qui ont une cohésion beaucoup plus élevée que celle du reste du joint. La force résistante est alors la somme des résistances du pont rocheux et du reste du joint.

#### 4.2.6. Glissement avec pont rocheux dans un joint sollicité en traction

Le problème est alors hyperstatique. La méthode la plus simple consiste à supposer que la force exercée par le pont rocheux est parallèle à la direction du glissement du bloc.

### 4.3. GLISSEMENT SUR DEUX PLANS $i$ ET $j$

#### 4.3.1. Cas général (figure 4.1 et 4.3)

$$R_t = R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{w}_{ij})$$

$$R_n = R \sin(\mathbf{R}, \mathbf{w}_{ij})$$

$R_{ni} = N_i$  et  $R_{nj} = N_j$  sont données par les équations suivantes :

$$R_n \sin(\mathbf{R}_n, \mathbf{n}_j) = R_{ni} \sin(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j)$$

$$R_n \sin(\mathbf{R}_n, \mathbf{n}_i) = R_{nj} \sin(\mathbf{n}_j, \mathbf{n}_i)$$

Attention,  $R_{ni}$  n'est pas la projection orthogonale de  $\mathbf{R}$  sur  $\mathbf{n}_i$  ( $R_{ni} \neq R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)$ ).

$$F = T_{\max} / R_t$$

avec

$$T_{\max} = \sum (N_i \operatorname{tg} \Phi_i + c_i A_i)$$

### 4.3.2. Glissement dû au seul poids du bloc, sur deux plans sans cohésion et de même angle de frottement $\Phi$ (figure extraite de Hoek et Bray)

$$R_t = W \cos(\mathbf{W}, \mathbf{w}_{ij}) = W \sin \psi_{ij}$$

$$R_n = W \sin(\mathbf{W}, \mathbf{w}_{ij}) = W \cos \psi_{ij}$$

$\psi_{ij}$  étant l'inclinaison de l'intersection des deux plans.

On obtient une expression simple du coefficient de sécurité, en introduisant les angles  $\xi$  et  $\beta$ , qui représentent respectivement l'ouverture du dièdre de glissement (angle entre les deux plans dans la pyramide de joints) et son déversement (défini sur la figure 4.4) :

$$F = \frac{\sin \beta}{\sin(\xi/2)} \frac{\tan \phi}{\tan \psi_{ij}}$$

Les angles  $\xi$  et  $\beta$  peuvent être déterminés en représentation stéréographique (figure 4.5).

F est toujours plus grand que  $\frac{\tan \phi}{\tan \psi_{ij}}$ , coefficient de sécurité pour le glissement sur un plan de pendage  $\psi_{ij}$ .

Il en résulte que si l'angle de frottement  $\phi$  est supérieur à  $\psi_{ij}$ , le bloc est stable. D'autre part, on constate que le coefficient de sécurité est d'autant plus faible que le dièdre est ouvert et déversé.

### 4.3.3. Glissement dû au poids et aux forces hydrauliques (figure extraite de Panet et Rotheval)

### 4.3.4. Analyse graphique du glissement sur deux plans sans cohésion (Figure 4.6)

$\mathbf{R}$  peut être décomposée en 2 composantes opposées aux réactions s'exerçant sur les plans i et j et qui appartiennent respectivement aux plans  $(n_i, w_{ij})$  et  $(n_j, w_{ij})$ , car les réactions tangentielles sont dans la direction du mouvement. A l'équilibre limite, le frottement est mobilisé sur les 2 plans. Les composantes de R sur chacun des plans appartiennent alors également aux cônes de frottement respectifs de chacun de ces plans. Elles sont donc portées par les intersections de ces cônes de frottement avec les plans  $(n_i, w_{ij})$  et  $(n_j, w_{ij})$  (notées p, q, s et t sur la figure 4.6) et la résultante R appartient alors aux plans définis par ces intersections, qui constituent les limites du domaine de stabilité. Le domaine de stabilité est donc limité par les deux cônes et par les plans définis par les intersections de ces cônes de frottement avec les plans  $(n_i, w_{ij})$  et  $(n_j, w_{ij})$ .

## 5. STABILITE D'UN BLOC AU BASCULEMENT (RENVERSEMENT)

Coefficient de sécurité = Moment résistant maximal mobilisable / Moment moteur

Bloc reposant sur un joint de résistance en traction nulle : si le moment moteur tend à ouvrir le joint, celui-ci ne peut opposer aucun moment résistant et le bloc est instable.

Bloc reposant sur un joint de résistance en traction non nulle : le joint est sollicité d'un côté en traction, de l'autre en compression.

## 6. STABILITE D'UN ENSEMBLE DE BLOCS

L'analyse de stabilité d'un bloc nécessite de connaître la résultante des forces actives s'exerçant sur celui-ci. Or, dans certains cas, les blocs amovibles sont soumis à des forces actives exercées par d'autres blocs. L'analyse de stabilité doit alors concerner plusieurs blocs. Un exemple simple est celui du glissement à deux blocs, dans lequel un bloc, dit passif, est instable à cause de l'action exercée par un deuxième bloc, dit actif. Une analyse de stabilité du bloc passif, ne prenant en compte que son poids, conclurait à sa stabilité. Des méthodes d'analyse à l'équilibre limite ont été développées pour étudier quelques mécanismes particuliers d'interaction entre blocs. Théoriquement, les méthodes d'éléments discrets (décrites dans un autre chapitre) permettent de détecter systématiquement ce type d'instabilité.

## 6.1. GLISSEMENT FRACTIONNE

Une masse rocheuse peut glisser sur une surface polyédrique en se déformant. Le plus souvent, la déformation se produit par cisaillement de discontinuités préexistant dans la masse rocheuse. Si les forces motrices sont dans un même plan vertical, le problème peut être traité en 2 dimensions.

### 6.1.1. Glissement fractionné en 2D

Considérons une masse rocheuse susceptible de glisser sur une surface polyédrique constituée de  $N$  plans de glissements, et comportant  $(N-1)$  discontinuités permettant le mouvement de  $N$  compartiments indépendants ("blocs" au sens large).

*Remarque*

*Pour les glissements dans les sols, on considère souvent des tranches verticales fictives, pour les besoins du calcul. Dans les massifs rocheux, les limites entre tranches ne sont généralement pas fictives ni verticales.*

Pour analyser les mouvements qui, à l'évidence, n'impliquent pas de rotation des blocs, on admet que l'équilibre des moments est réalisé. La méthode de l'équilibre limite consiste à supposer, dans un premier temps, que le système est à la limite de l'équilibre. Les équations d'équilibre des  $N$  blocs ( $2N$  équations), et les critères de rupture des  $N$  plans de glissement et des  $(N-1)$  plans délimitant les blocs fournissent alors  $(4N-1)$  équations. Les inconnues sont les composantes des forces s'exerçant sur les  $N$  plans de glissement et les  $(N-1)$  discontinuités délimitant les compartiments ( $(4N-2)$  inconnues). Comme, dans le cas général, toutes les équations ne sont pas satisfaites, on introduit un paramètre supplémentaire, qui est le plus souvent un coefficient de sécurité  $F$ , s'appliquant sur la résistance au cisaillement de certaines discontinuités. Le coefficient de sécurité peut donc se définir comme le coefficient par lequel il faut diviser les résistances au cisaillement pour satisfaire l'équilibre limite. Dans le cas d'un glissement translationnel, cette définition est équivalente à celle donnée au paragraphe 4.1.4.

On peut distinguer deux méthodes :

- la méthode globale, qui consiste à résoudre le système d'équations en appliquant le même coefficient de sécurité à toutes les discontinuités (méthode de Sarma, 1979, utilisée également en mécanique des sols) ;
- la méthode pas à pas, qui consiste à analyser d'abord la stabilité du bloc le plus haut, supposé sans interaction avec les blocs inférieurs, puis, s'il n'est pas stable, à calculer la réaction nécessaire, à l'interface avec le bloc inférieur, pour obtenir l'équilibre limite (Panet et Rotheval font l'hypothèse que cette réaction est dirigée dans la direction de glissement du bloc supérieur, et vérifient que cela est compatible avec l'angle de frottement ; dans le cas contraire, la direction de la réaction est donnée par l'angle de frottement) ; on analyse ensuite la stabilité du 2<sup>o</sup> bloc, et ainsi de suite jusqu'au bloc le plus bas, dont on calcule le coefficient de sécurité.

### 6.1.2. Glissement fractionné en 3D

Il est possible de faire des analyses tridimensionnelles suivant le même principe.

## 6.2. BASCULEMENT ET GLISSEMENT

Une rupture par basculement peut se produire dans un talus, lorsque le massif est découpé par deux familles de joints, comme sur la figure extraite de Goodman et Bray (1976). Le glissement est possible cinématiquement sur une des deux familles, mais l'angle de frottement est supérieur au pendage, de sorte que la masse rocheuse serait stable si elle n'était pas découpée par une seconde famille de joints. Dans ce cas, on observe généralement trois groupes de blocs : un groupe de blocs stables en amont ; un groupe intermédiaire de blocs instables par basculement ; en pied, des blocs qui glissent sous la poussée des blocs intermédiaires (pour certaines géométries de talus, ce troisième groupe peut être absent).

Pour cette configuration, une méthode d'analyse pas à pas a été proposée par Goodman et Bray (1976). Elle consiste d'abord à rechercher le premier bloc qui peut basculer et à déterminer la force  $P_{n-1,T}$  nécessaire pour assurer son équilibre. La condition de basculement d'un bloc  $n$ , qui ne subit pas de poussée en amont, est :

$$Y_n / \Delta x > \cotg \alpha \text{ (notations de Goodman et Bray)}$$

Ensuite les forces  $P_{n-1,T}$  et  $P_{n-1,S}$  nécessaires pour assurer l'équilibre des blocs respectivement en rotation et en glissement, sont déterminées pour chaque bloc, et la force la plus grande est appliquée sur le bloc inférieur :

$$P_{n-1} = \max (P_{n-1,T}, P_{n-1,S})$$

Si la force  $P_0$ , nécessaire pour stabiliser le dernier bloc, est positive, le talus est instable pour l'angle de frottement choisi. Si elle est négative, le talus est stable. Le coefficient de sécurité du talus peut être obtenu en recherchant l'angle de frottement  $\phi_r$  nécessaire pour obtenir l'équilibre limite :

$$F = \tan \phi / \tan \phi_r$$

Les méthodes numériques par éléments discrets permettent d'analyser des situations plus complexes sans avoir à définir à l'avance le mécanisme de rupture. De plus, elles permettent de simuler les mouvements des blocs jusqu'à l'arrêt (figure d'après Alfonsi et al.).

## BIBLIOGRAPHIE

CFMR. Manuel de mécanique des roches, tome 1, Fondements. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 2000, 265 pages.

CFMR. Manuel de mécanique des roches, tome 2, Applications. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 2004, 458 pages.

Derradji A. et Sahli M. Eléments de stabilité des pentes au rocher. ADM Académie, 2016, 149 pages.

Goodman R.E. Introduction to Rock Mechanics. Wiley, 1989, 562 pages.

Goodman R.E. et Shi G. Block theory and its application to rock engineering. Prentice-Hall, 1985, 338 pages..

Hoek E. et Bray J.W. Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, Londres, 1981, 358 pages.

Panet M. et Rotheval J-P. Stabilité des masses rocheuses. La mécanique des roches appliquée au génie civil, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1976, pp.109-119.

Wyllie D.C. Rock Slope Engineering, Civil Applications. CRC Press, 2018.





## Stabilité des massifs fracturés - Méthodes d'équilibre limite

### Diapos illustrant le cours

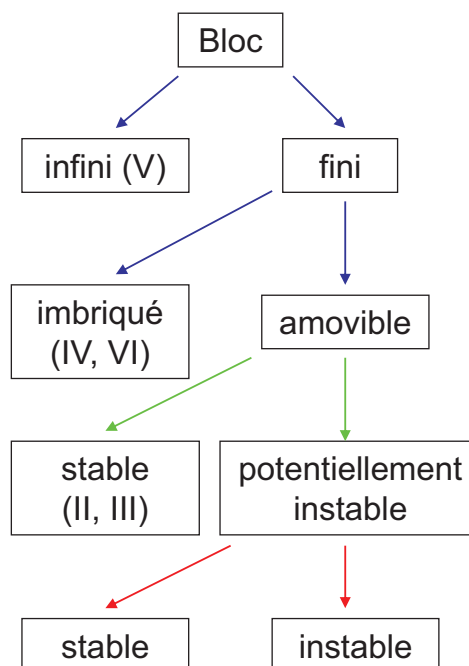
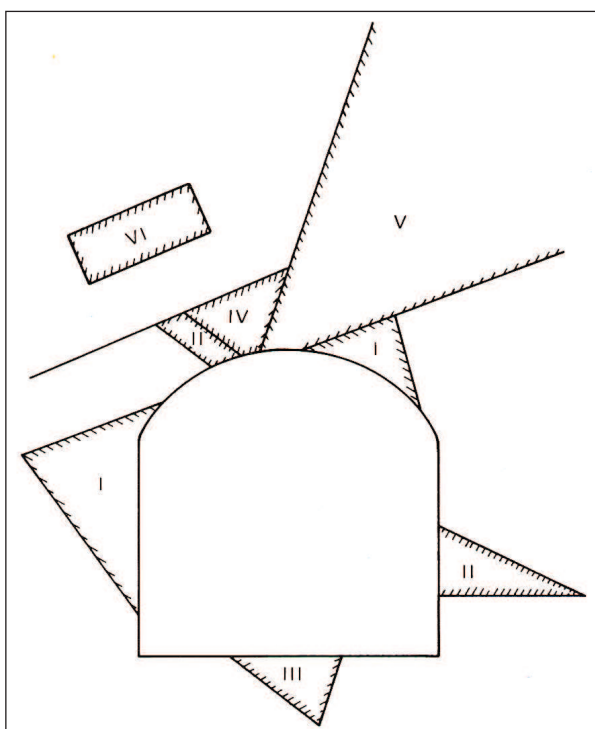
#### Hypothèses de la théorie des blocs de Goodman et Shi (1985)

- Le massif rocheux est délimité par des surfaces libres planes (plans d'excavation) et découpé en blocs par des discontinuités planes fermées (joints) d'extension infinie. Les joints sont répartis en familles de plans parallèles. La situation de ces plans dans l'espace n'est généralement pas connue.
- Un plan d'excavation délimite 2 demi-espaces : un demi-espace vide et un demi-espace rocheux. Un joint délimite 2 demi-espaces rocheux, notés 0 et 1 (0 pour celui qui est au-dessous, 1 pour celui qui est au-dessus).
- La matrice rocheuse est supposée suffisamment résistante pour qu'il n'y ait pas de rupture des blocs.

1

#### Présentation de la théorie des blocs

Figure 1.1. Types de blocs dans un massif rocheux fracturé dans le cas où les blocs sont soumis seulement à leur poids  
(d'après Goodman, 1989, *Introduction to rock mechanics*, Wiley)



Détermination des blocs amovibles  
 Analyse du mode d'instabilité  
 Analyse de stabilité

2

## Détermination des blocs amovibles (2D)

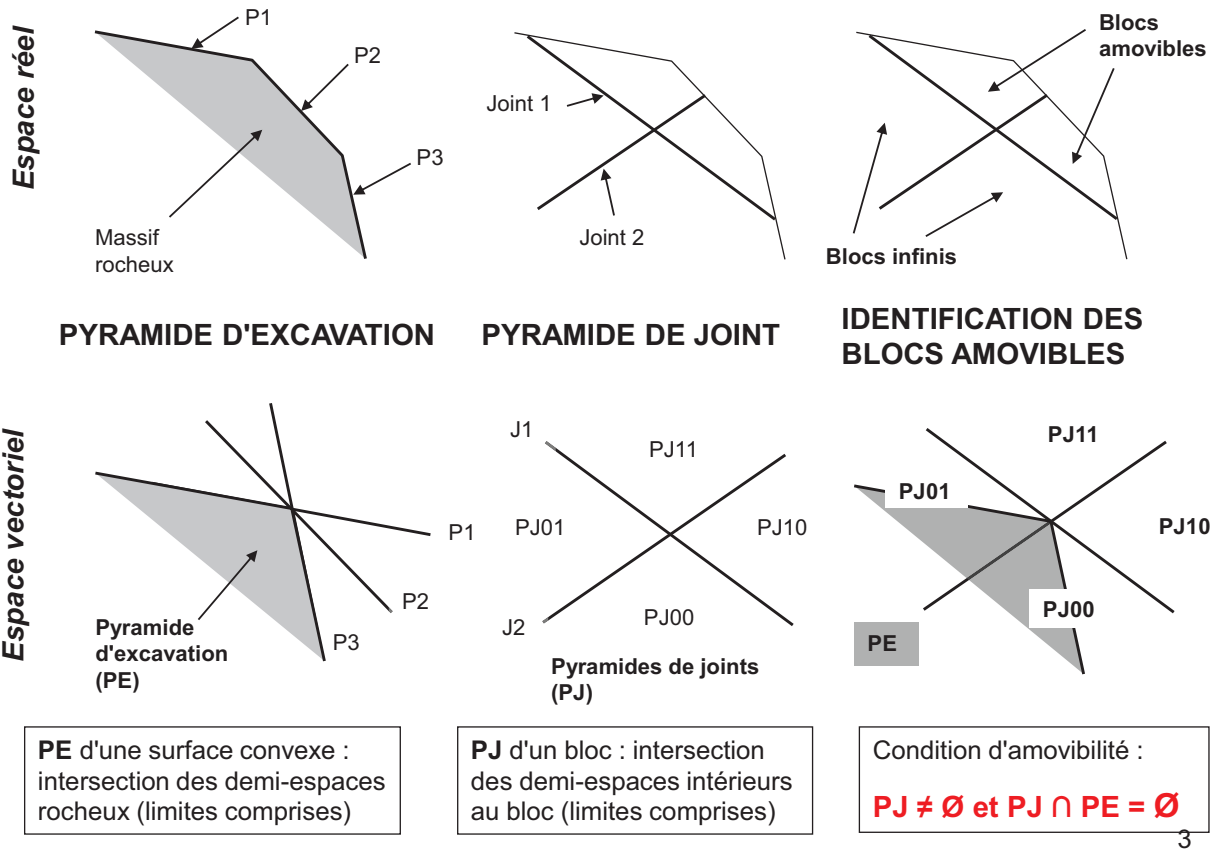
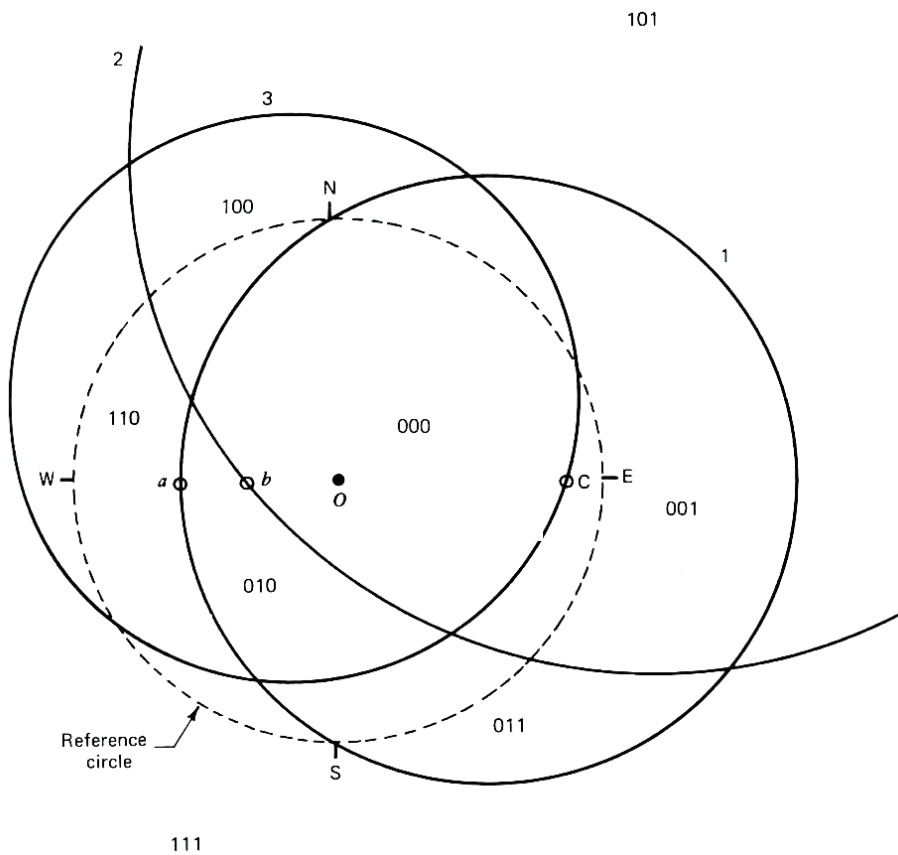
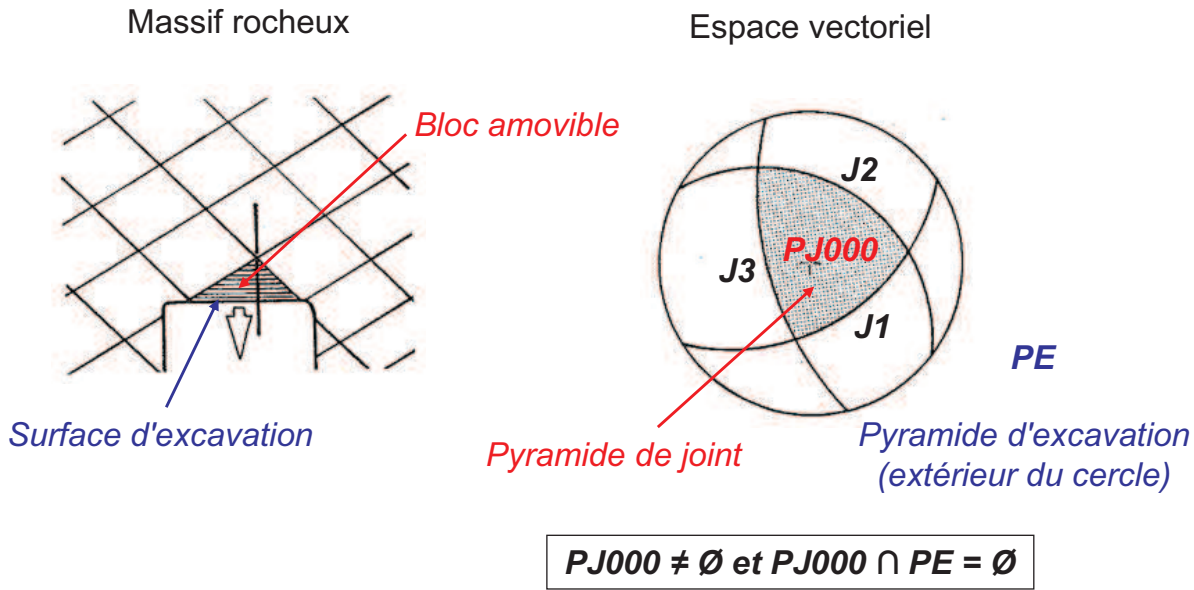


Figure 2.1

## Détermination des blocs amovibles Désignation des pyramides de joints en 3D



## Détermination des blocs amovibles (3D)



La condition d'amovibilité est respectée donc les blocs situés sous les joints J1, J2 et J3 sont amovibles

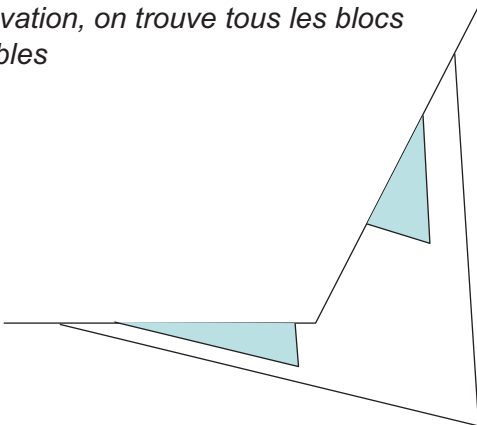
5

## Détermination des blocs amovibles

### Cas des surfaces rocheuses concaves

#### SURFACE D'EXCAVATION CONCAVE

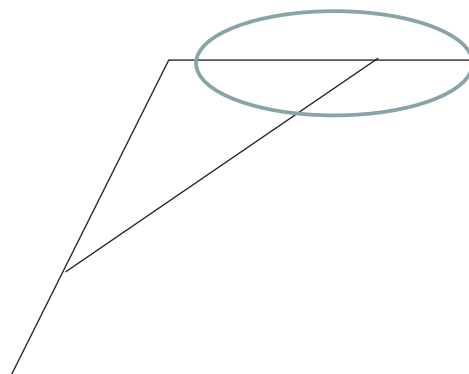
En considérant séparément les plans d'excavation, on trouve tous les blocs amovibles



Il suffit de considérer les plans séparément pour trouver tous les blocs amovibles

#### SURFACE D'EXCAVATION CONVEXE

En considérant un seul plan d'excavation, on ne trouve pas de bloc amovible



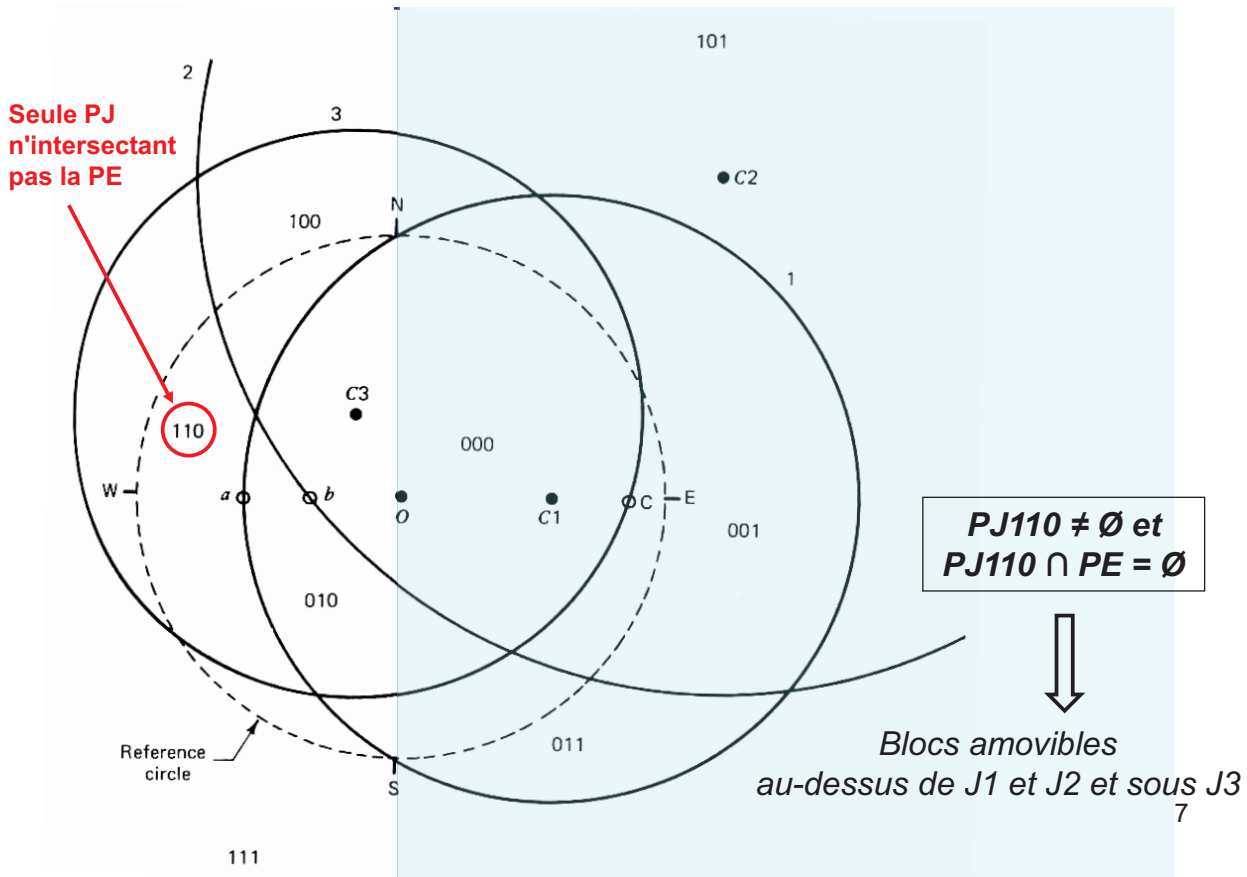
Il faut considérer tous les plans qui délimitent le massif pour trouver tous les blocs amovibles

Figure 2.2

6

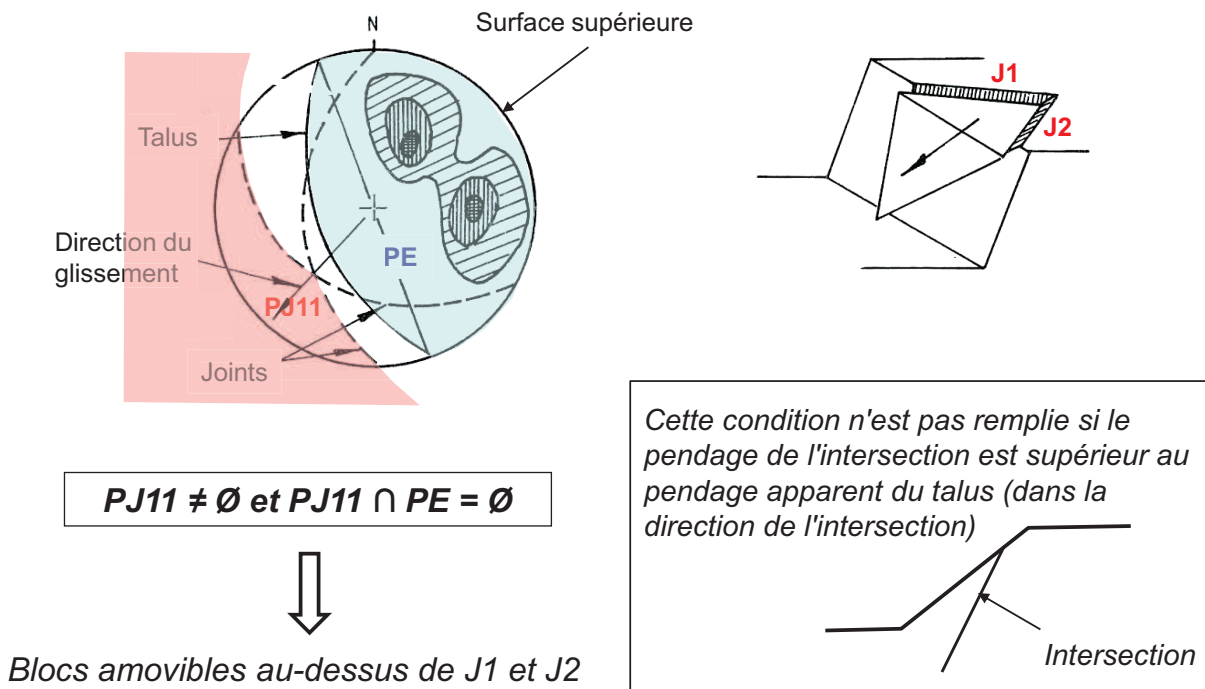
## Détermination des blocs amovibles

Cas d'une paroi verticale NS orientée vers l'ouest (paroi d'une galerie)



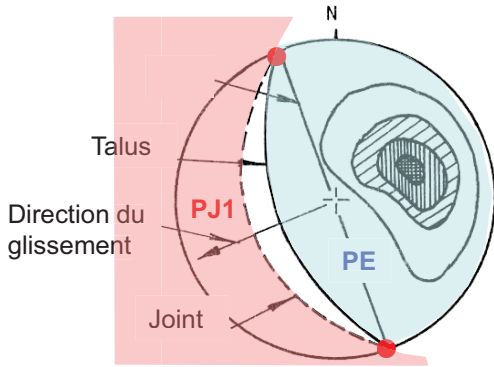
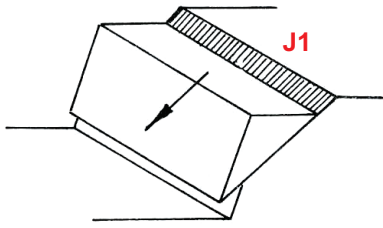
## Détermination des blocs amovibles

Cas d'un talus



## Détermination des blocs amovibles

Cas d'une famille de même azimut que le talus



$$PJ1 \neq \emptyset \text{ mais } PJ1 \cap PE \neq \emptyset$$

### En théorie

- Pas de blocs amovibles pour un talus infini ou sans surfaces libres latérales
- Blocs amovibles si le talus est limité par des plans d'excavation (la PE est réduite)

### En pratique

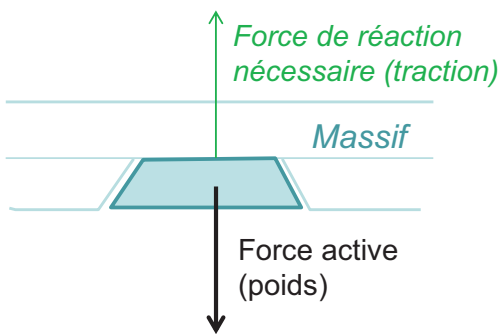
Il suffit de quelques fractures d'orientations différentes pour qu'il existe un bloc amovible.  
 Dans un projet de déblai, on considère généralement qu'il peut y avoir des blocs amovibles

- si la différence d'azimut avec le talus est inférieure à  $20^\circ$
- et si le pendage des joints est inférieur à celui du talus

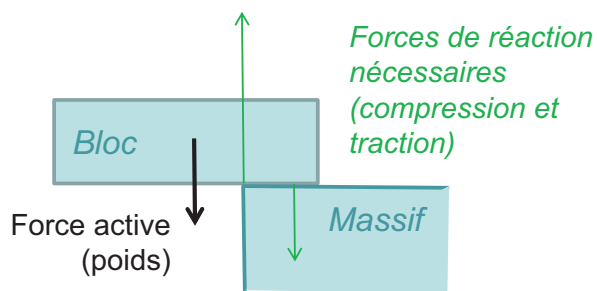
9

## Détermination du mode d'instabilité potentielle

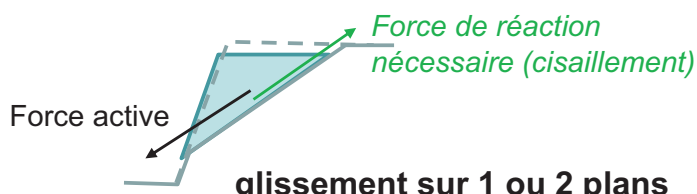
Modes d'instabilité potentielle :  
 décollement, basculement, glissement



**décollement** (ici chute libre)



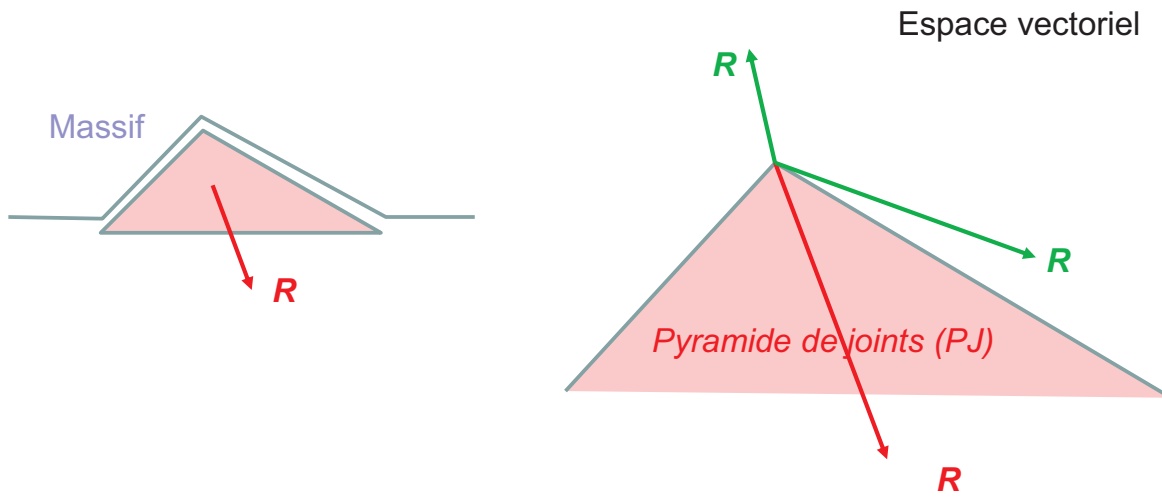
**basculement**



**glissement sur 1 ou 2 plans**

10

## Détermination du mode d'instabilité potentielle



**Condition pour le mode décollement :**

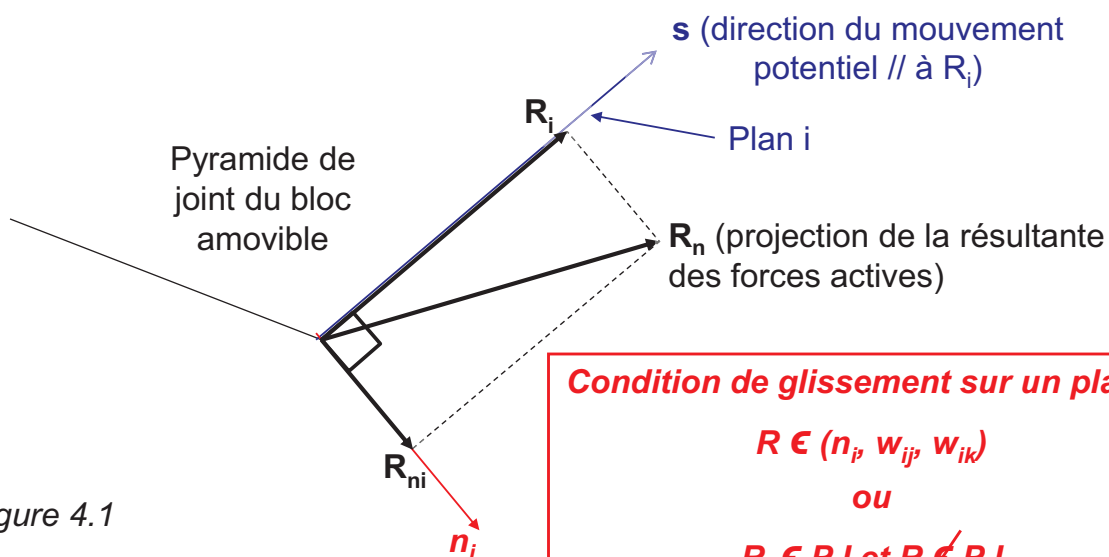
$$R \in PJ$$

11

## Détermination du mode d'instabilité potentielle

### Glissement sur un plan $i$

Vue dans le plan défini par la résultante des forces actives  $R$  et sa projection sur le plan  $i$ .



**Condition de glissement sur un plan  $i$  :**

$$R \in (n_i, w_{ij}, w_{ik})$$

ou

$$R_i \in PJ \text{ et } R \notin PJ$$

Figure 4.1

$n_i$  : vecteur normal au plan  $i$ , dirigé vers l'extérieur du bloc

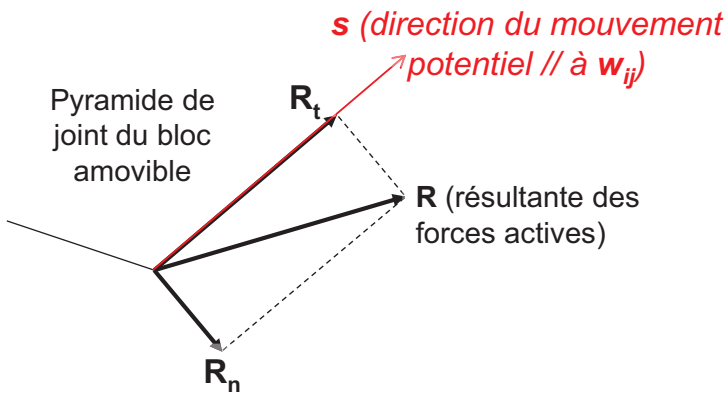
$w_{ij}$  : vecteur intersection des plans  $i$  et  $j$ , appartenant à la pyramide de joint

12

## Détermination du mode d'instabilité potentielle

### Glissement sur deux plans i et j

Vue dans le plan défini par la résultante des forces actives  $\mathbf{R}$  et l'intersection des 2 plans ( $\mathbf{w}_{ij}$ )



**Condition de glissement sur 2 plans i et j :**  
 $\mathbf{R} \in (\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j, \mathbf{w}_{ij})$

Vue dans le plan des normales (perpendiculaire à la direction du mouvement)

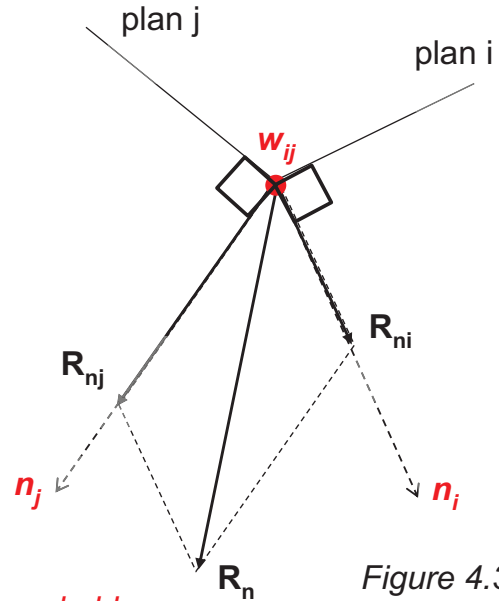


Figure 4.3

$\mathbf{n}_i$  : vecteur normal au plan i, dirigé vers l'extérieur du bloc

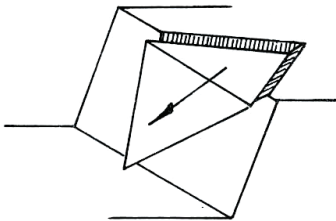
$\mathbf{w}_{ij}$  : vecteur intersection des plans i et j, appartenant à la pyramide de joint

13

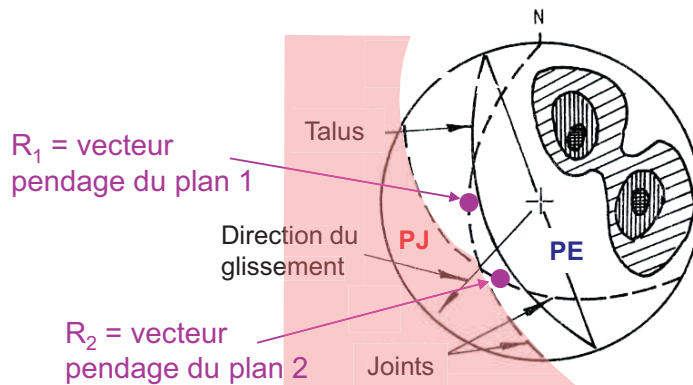
## Détermination du mode d'instabilité potentielle

Cas d'un talus

Bloc amovible soumis à son seul poids



Ni  $\mathbf{R}_1$ , ni  $\mathbf{R}_2$  n'appartiennent à la pyramide de joint  
 Donc pas de glissement sur J1 ou J2



$\mathbf{R} \in (\mathbf{R}_{ni}, \mathbf{R}_{nj}, \mathbf{w}_{ij})$  donc glissement sur J1 et J2

**Autre formulation pour le cas des talus (Hoek et Bray, 1974)**

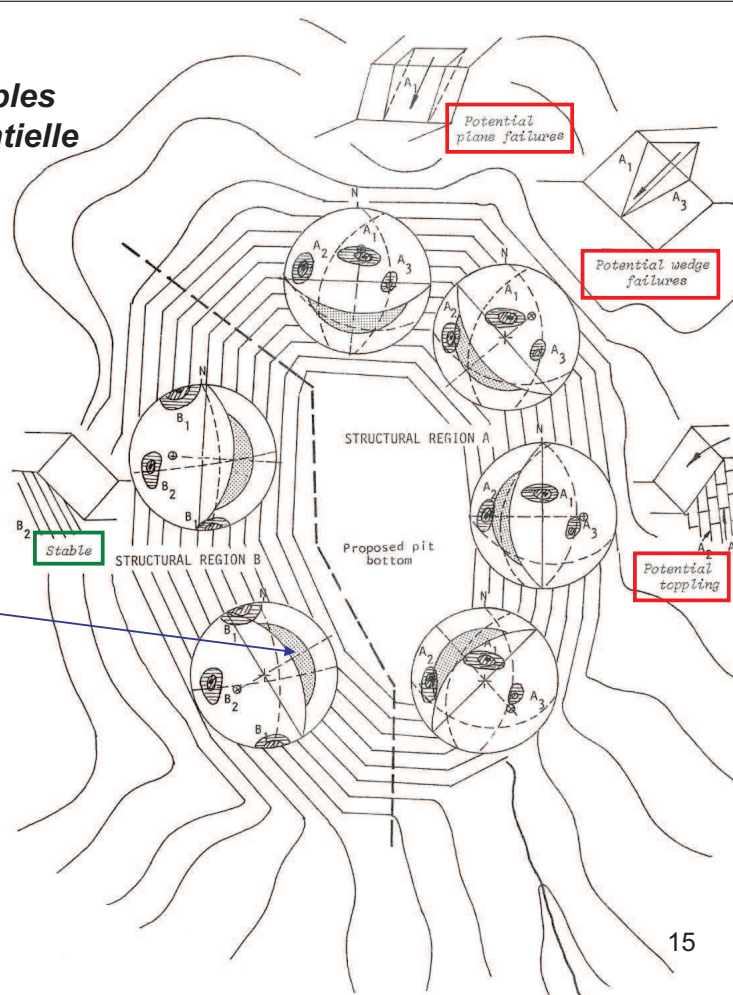
Si la direction du pendage d'un plan se trouve entre la direction de pendage du talus et la direction de l'intersection, le glissement se produit sur ce plan (selon son vecteur pendage) et non sur les 2 plans.

14

## Détermination des blocs amovibles et des modes d'instabilité potentielle

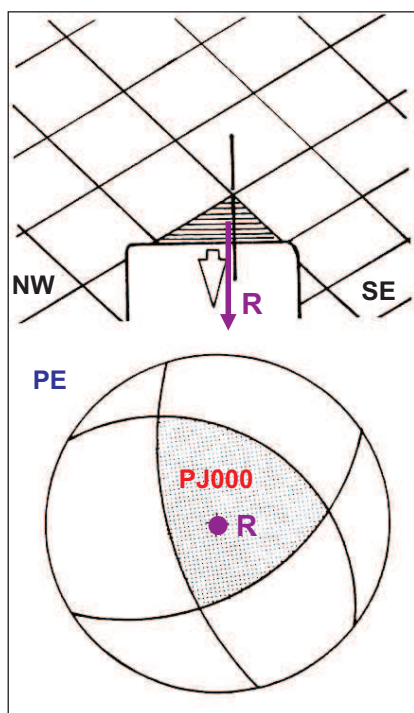
### Exemple d'une carrière

Zone correspondant à un pendage supérieur à l'angle de frottement



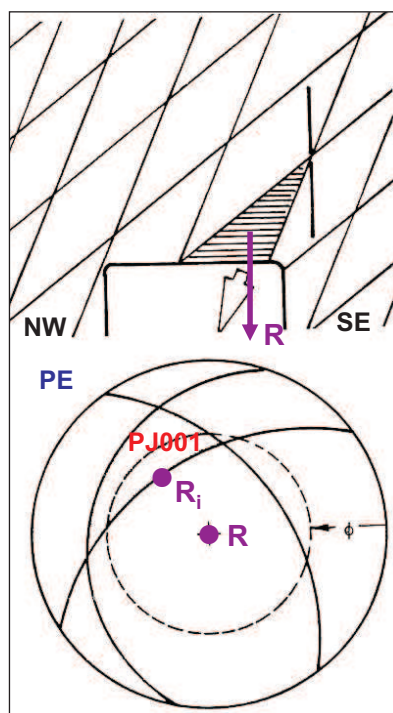
15

## Détermination du mode d'instabilité potentielle Cas du toit d'une cavité



Mode d'instabilité : décollement

Condition :  $R \in PJ$



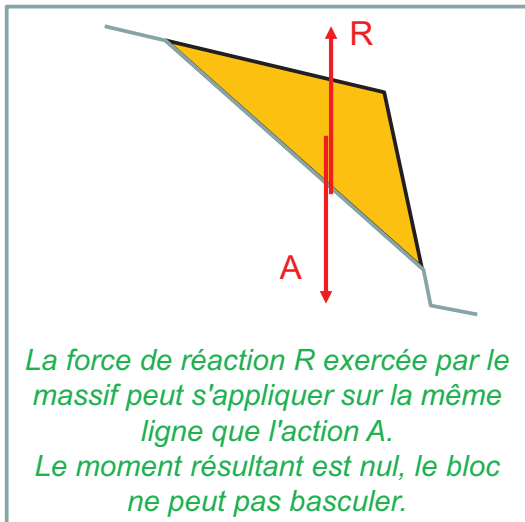
Mode d'instabilité : glissement sur  $i$

Condition :  $R \notin PJ$  et la projection  $R_i$  de  $R$  sur le plan  $i \in PJ$

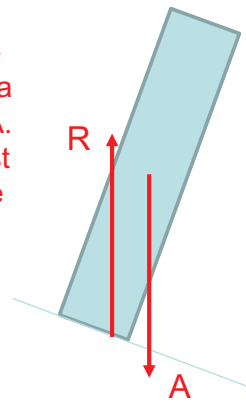
16



## Détermination du mode d'instabilité potentielle "basculement"



La force de réaction  $R$  exercée par le massif ne peut pas s'appliquer sur la même ligne que l'action  $A$ . Le moment résultant n'est pas nul, le bloc risque de basculer.



Condition suffisante pour le mode basculement :  
la demi-droite portant la résultante des forces actives intersecte une face libre du bloc, mais n'appartient pas à la pyramide de joints définissant le bloc amovible.

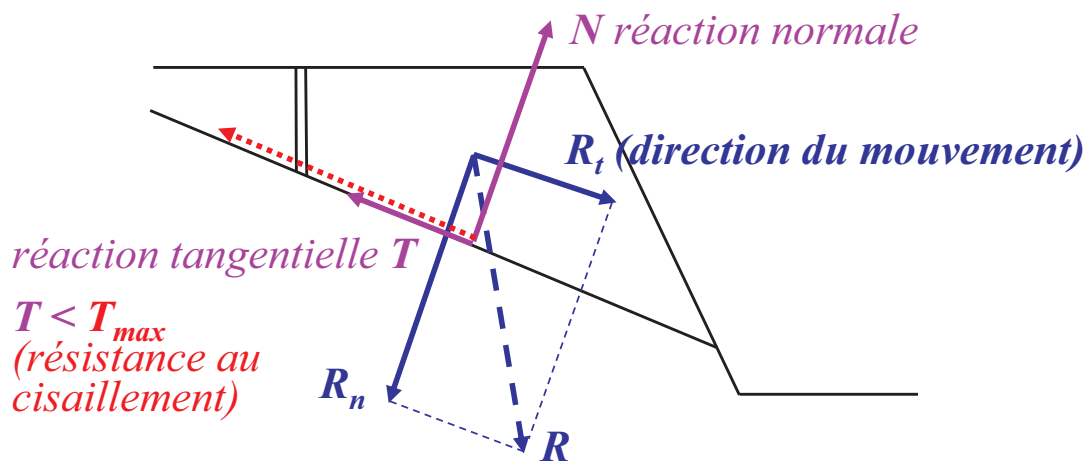
17

## Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan



18

## Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan



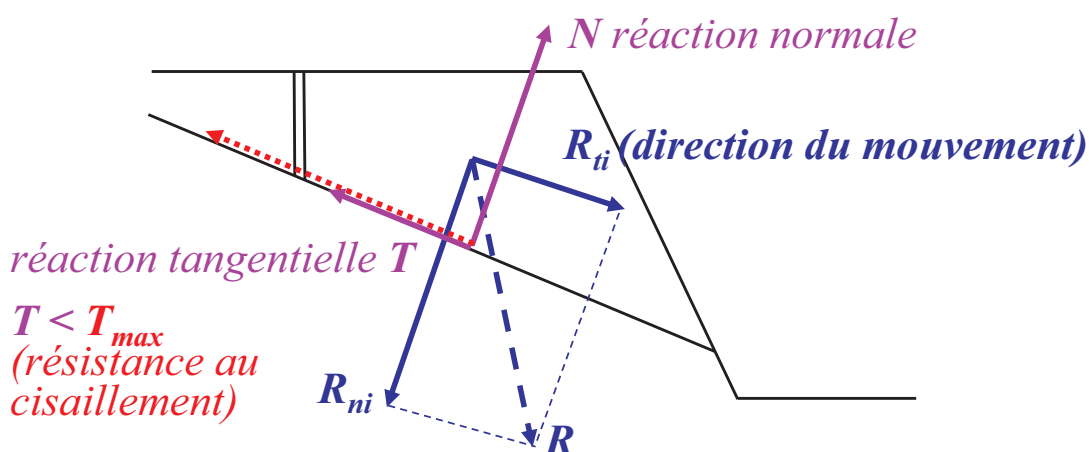
- Si  $R_t < T_{max}$ ,  $T = R_t$  ; le bloc est stable
- Si  $R_t = T_{max}$ ,  $T = R_t = T_{max}$  ; le bloc est en équilibre limite
- Si  $R_t > T_{max}$ ,  $T = T_{max}$  ; le bloc subit une accélération  $a$  telle que  $M a = R_t - T_{max}$

Pour quantifier la stabilité, on utilise le coefficient de sécurité

$$F = T_{max} / R_t$$

19

## Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan $i$



$$R_{ti} = R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{R}_{ti}) = R \sin(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)$$

$$R_{ni} = R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i) = N_i$$

$$T_{max} = R_{ni} \tan \phi_i + c_i A_i$$

$A_i$  : aire de la surface de glissement

$$F = T_{max} / R_{ti}$$

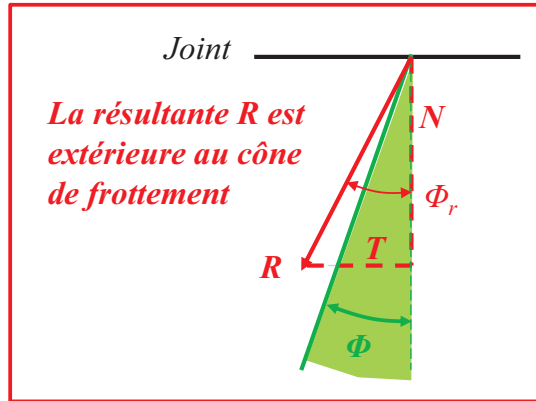
$$F = \frac{R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i) \tan \phi_i + c_i A_i}{R \sin(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)} = \frac{\tan \phi_i}{\tan(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)} + \frac{c_i A_i}{R \sin(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)}$$

20

**Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan**  
**Méthode du cône de frottement**  
**(joint sans cohésion)**

Si  $c = 0$        $F = \frac{\tan \phi_i}{\tan(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)}$

**Rupture si**  
 **$(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i) > \Phi_i$**        $\Leftrightarrow$

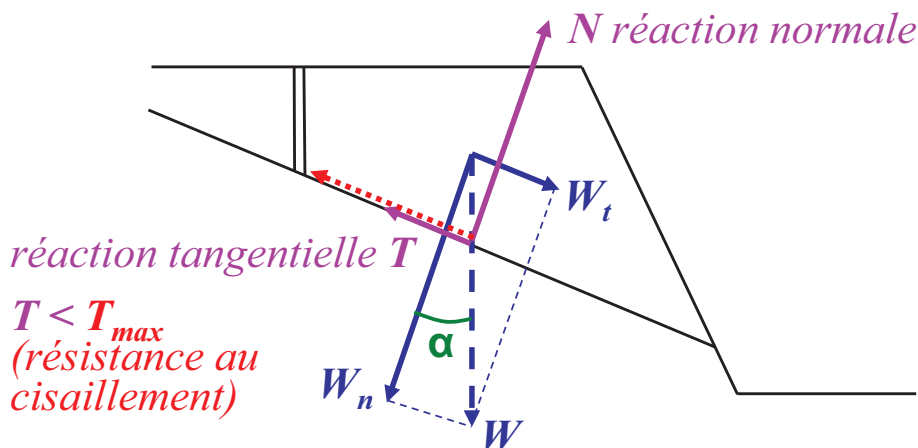


Le coefficient de sécurité peut s'écrire :       $F = \frac{\tan \phi_i}{\tan(\mathbf{R}, \mathbf{n}_i)} = \frac{\tan \phi_i}{\tan \phi_r}$

$\Phi_r$  : angle de frottement requis pour assurer la stabilité

21

**Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan**  
**Cas d'un talus sous l'action du poids seul**



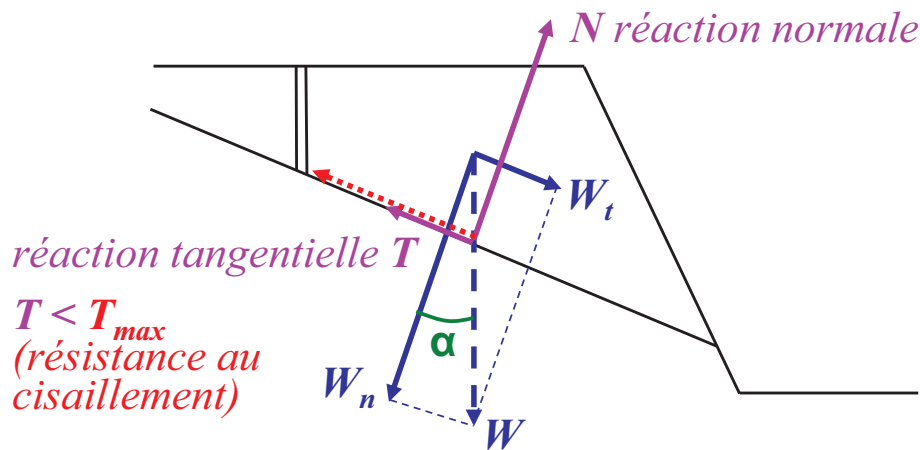
$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cA}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cA}{W \sin \alpha}$$

A : aire de la surface de glissement  
 $\alpha$  : pendage du plan de glissement

Si  $c = 0$  :       $F = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$

22

**Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan**  
**Cas d'un talus sous l'action du poids seul**

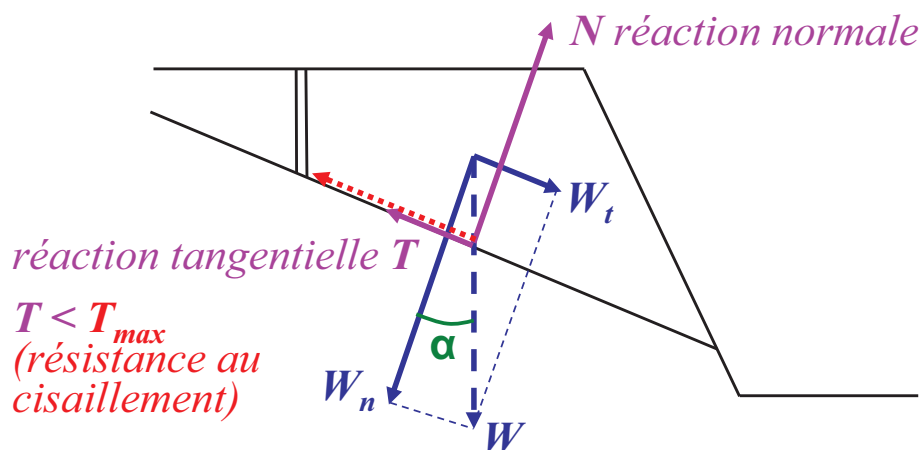


$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cA}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cA}{W \sin \alpha}$$

Pour améliorer la stabilité, on peut diminuer le poids

23

**Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan**  
**Cas d'un bloc prismatique (problème 2D) soumis à son seul poids**



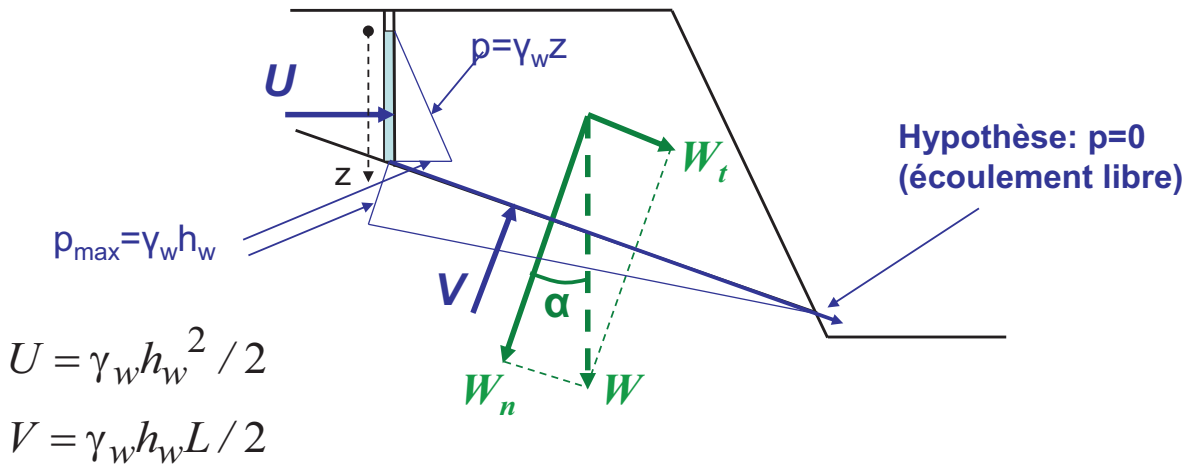
$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{W \cos \alpha \tan \phi + cL}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{cL}{W \sin \alpha}$$

W : poids par mètre de largeur (poids d'une tranche d'1 m d'épaisseur)

L : Longueur de la surface de glissement ;  $\alpha$  : pendage du plan de glissement

24

**Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan**  
**Cas d'un bloc prismatique (problème 2D)**  
**soumis à son poids et à des pressions d'eau**



$$U = \gamma_w h_w^2 / 2$$

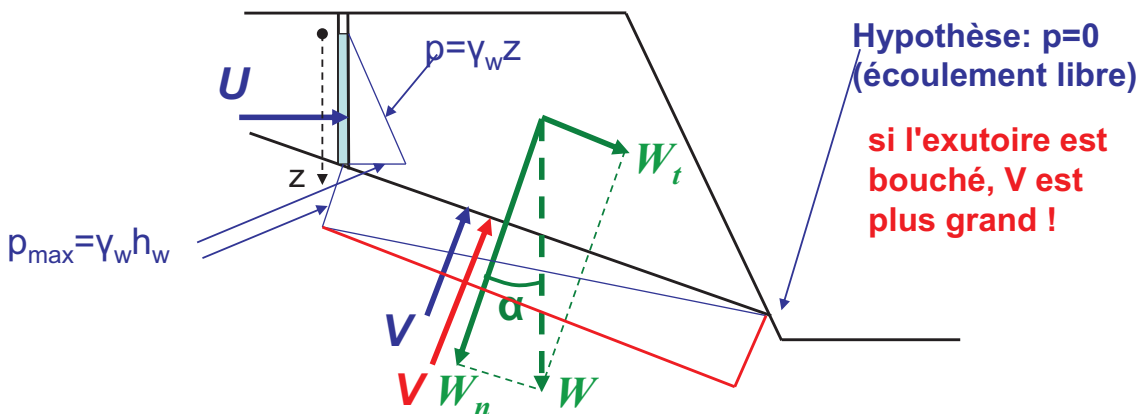
$$V = \gamma_w h_w L / 2$$

$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{(W \cos \alpha - V - U \sin \alpha) \tan \phi + cL}{W \sin \alpha + U \cos \alpha}$$

**W** : poids par mètre de largeur ;  **$\gamma_w$**  : poids volumique de l'eau  
**L** : longueur du plan de glissement ;  **$\alpha$**  : pendage du plan de glissement ;

25

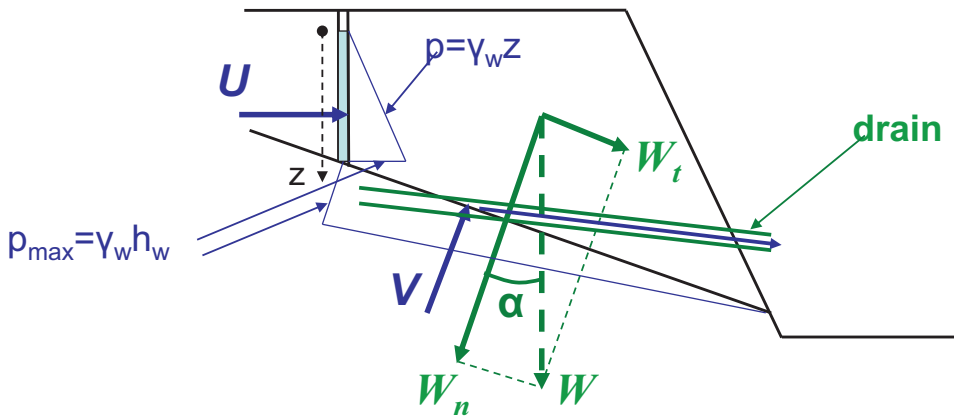
**Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan**  
**Cas d'un bloc prismatique (problème 2D)**  
**soumis à son poids et à des pressions d'eau**



$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{(W \cos \alpha - V - U \sin \alpha) \tan \phi + cL}{W \sin \alpha + U \cos \alpha}$$

26

**Analyse de stabilité – Glissement sur 1 plan**  
**Cas d'un bloc prismatique (problème 2D)**  
**soumis à son poids et à des pressions d'eau**



$$F = \frac{T_{max}}{W_t} = \frac{(W \cos \alpha - V - U \sin \alpha) \tan \phi + cL}{W \sin \alpha + U \cos \alpha}$$

Pour améliorer la stabilité, il faut diminuer U et V  
 → drainage

27

**RD 1091 - Déviation au droit des Ruines de Séchilienne**  
 Coupe de principe

Méthodes d'amélioration de la stabilité

Terrain naturel

Réduction du poids

Renforcement par armatures passives

Drainage

**LES PRINCIPAUX OUVRAGES ET AMENAGEMENTS**

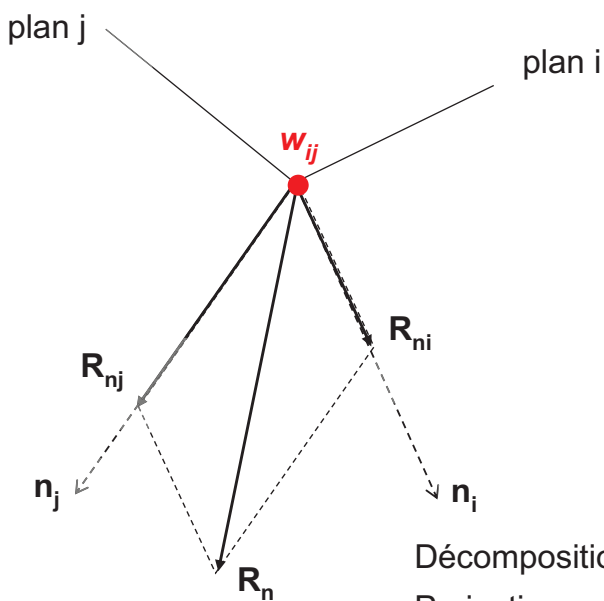
- 1 Piste piétons et cycles (largeur 5 mètres)
- 2 Chaussée de largeur 20 mètres à 2x2 voies sur 600 mètres
- 3 Profil du terrain avant travaux
- 4 Talus conforté (clouage, grillage, béton projeté)
- 5 Risbermes végétalisées (largeur 5 mètres)

28



Analyse de stabilité – Glissement sur 2 plans

Vue dans le plan des normales (perpendiculaire à la direction du mouvement)



$$R_t = R \cos(\mathbf{R}, \mathbf{w}_{ij})$$

$$R_n = R \sin(\mathbf{R}, \mathbf{w}_{ij})$$

$$R_n \sin(\mathbf{R}_n, \mathbf{n}_j) = R_{ni} \sin(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j)$$

$$R_n \sin(\mathbf{R}_n, \mathbf{n}_i) = R_{nj} \sin(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j)$$

$$F = T_{\max} / R_t$$

avec

$$T_{\max} = \sum (N_i \operatorname{tg} \Phi_i + c_i A_i)$$

$R_{ni} = N_i$  et  $R_{nj} = N_j$  sont données par les équations suivantes :

Décomposition de  $R_n$  suivant  $n_i$  et  $n_j$ .

Projection sur le plan  $j$ :  $R_n \sin(\mathbf{R}_n, \mathbf{n}_j) = R_{ni} \sin(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j)$

Projection sur le plan  $i$ :  $R_n \sin(\mathbf{R}_n, \mathbf{n}_i) = R_{nj} \sin(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j)$

Figure 4.3

# Analyse de stabilité

## Glissement sur 1 ou 2 plans - Méthode graphique

(d'après Goodman, 1989)

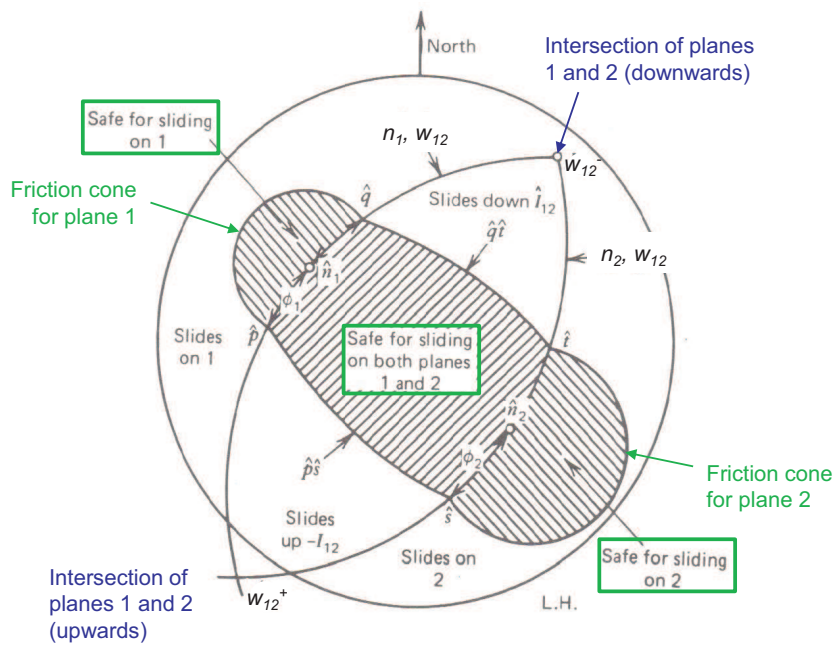
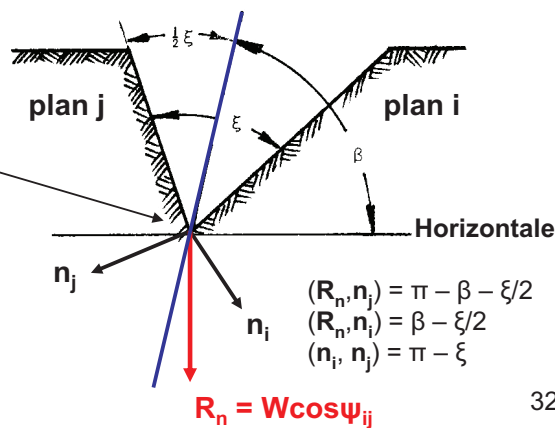
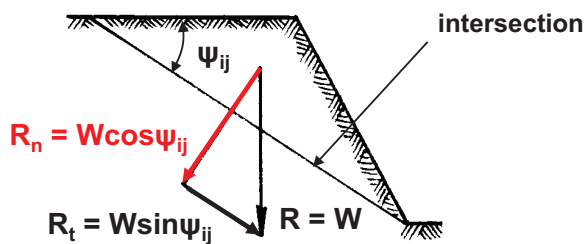
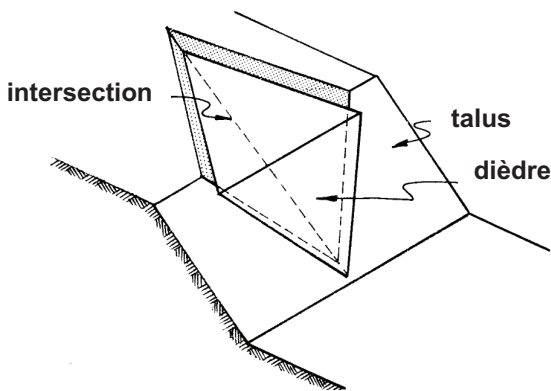


Figure 4.6  
31

Figure 4.4. ANALYSE DE STABILITE  
(GLISSEMENT D'UN BLOC SOUMIS A SON SEUL POIDS,  
SUR 2 PLANS SANS COHESION ET DE MEME ANGLE DE FROTTEMENT)

Le coefficient de sécurité dépend de l'angle de frottement  $\phi$ , de l'inclinaison de l'intersection  $\psi_{ij}$ , de l'ouverture du dièdre  $\xi$  et d'un angle  $\beta$ , qui définit le déversement du dièdre.

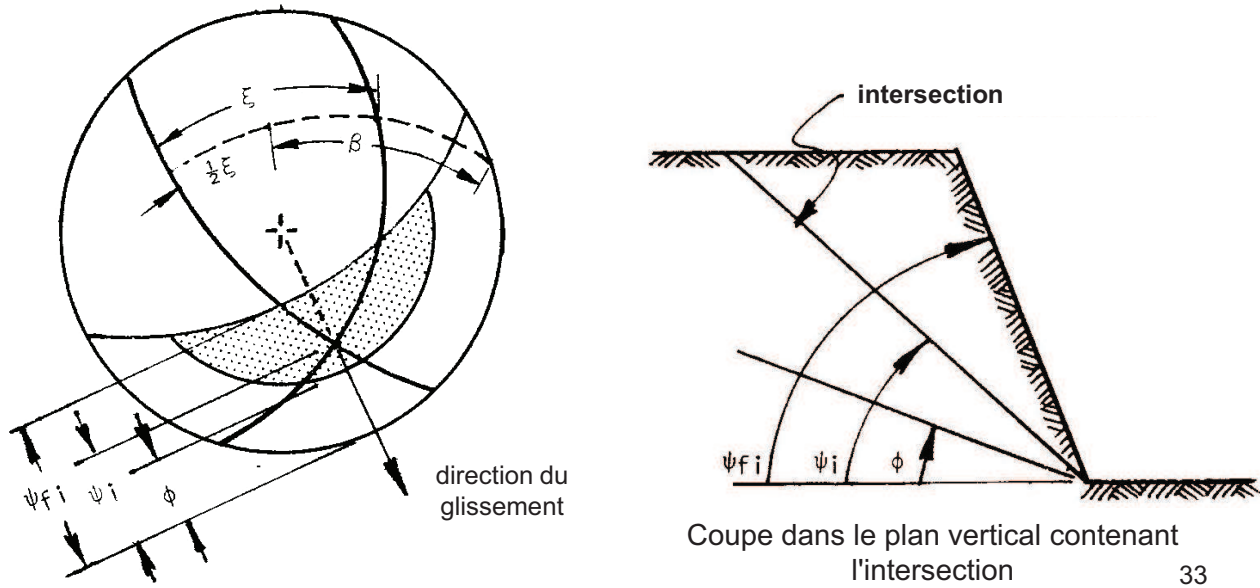
$$F = \frac{\tan \phi}{\tan \psi_{ij}} \frac{\sin \beta}{\sin(\xi/2)}$$





# Figure 4.5. ANALYSE DE STABILITE (GLISSEMENT D'UN BLOC SOUMIS A SON SEUL POIDS, SUR 2 PLANS SANS COHESION ET DE MEME ANGLE DE FROTTEMENT)

Détermination des angles  $\xi$  et  $\beta$ , et comparaison entre l'angle de frottement  $\Phi$ , l'inclinaison de l'intersection  $\psi_{ij}$  et le pendage apparent du talus  $\psi_{fj}$ .



## Analyse de stabilité

Le bloc monolithique est limité par une surface polyédrique correspondant à des plans de discontinuités. L'analyse à trois dimensions est fondée sur les mêmes hypothèses que celles qui ont été faites dans le paragraphe précédent.

La première phase de l'analyse consiste à déterminer les mouvements de glissement du bloc qui sont cinématiquement admissibles, compte tenu du poids et des sous-pressions. Le bloc peut soit glisser sur une face, les autres faces se détachant du massif, soit dans la direction de l'arête d'un dièdre en s'appuyant sur deux faces. Des règles simples permettent de mettre en évidence les mouvements possibles à partir des projections stéréographiques des différents plans.

L'analyse du glissement sur une seule face s'apparente au problème à deux dimensions traité au paragraphe précédent ; examinons plus complètement la stabilité au glissement d'un bloc limité par trois plans de discontinuité  $P_1, P_2, P_3$  dans la direction de l'intersection  $I_{12}$  des plans  $P_1$  et  $P_2$  ; le bloc se détache du massif suivant la face  $P_3$  ; nous faisons l'hypothèse qu'il n'existe pas de ponts rocheux suivant la face  $P_3$ .

L'analyse vectorielle nous conduit à l'expression suivante du coefficient de sécurité :

$$F = \frac{\sum_{r=1,2} c_r A_r + (W \sin(i_{12}, v) \left| \frac{\sin(n_2, j_v)}{\sin(n_r, n_s)} \right| - U_r - U_3 \sin(n_3, i_{12}) \left| \frac{\sin(n_r, n_3)}{\sin(n_r, n_s)} \right|) \tan \phi_r}{W \cos(i_{12}, v) + U_3 \sin(i_{12}, n_3)}$$

où  $i_{12}$  : le vecteur unitaire de  $I_{12}$  orienté dans le sens descendant

$v$  : le vecteur unitaire vertical descendant

$j_v$  : le vecteur unitaire dans le plan vertical tel que  $(i_{12}, j_v) = \frac{\pi}{2}$

$n_r$  : le vecteur unitaire sur la normale à  $P_r$  orienté vers l'intérieur du bloc

$A_r$  : l'aire de la face  $P_r$  du bloc

$c_r \phi_r$  : respectivement la cohésion et l'angle de frottement caractérisant la résistance au cisaillement le long de  $P_r$ .

La projection stéréographique permet d'obtenir facilement les différents angles dans la formule ci-avant - Figure 10 -.

On peut faire les mêmes remarques que dans le cas précédent sur l'influence des différents paramètres de résistance (valeurs de pic, valeurs résiduelles) et des conditions hydrauliques.

La figure 10 donne un exemple simple d'analyse de la stabilité d'un bloc limité par un dièdre  $P_1, P_2$  vis-à-vis du glissement dans la direction de l'intersection  $I_{12}$ . On fait l'hypothèse qu'il n'y a pas d'eau et on néglige la cohésion sur les faces  $P_1$  ; la formule donnant le coefficient de sécurité se réduit alors à :

$$F = \frac{\tan(i_{12}, v)}{\left| \frac{\sin(n_1, n_2)}{\sin(n_1, n_2)} \right| \{ |\sin(n_2, j_v)| \tan \phi_1 + |\sin(n_1, j_v)| \tan \phi_2 \}}$$

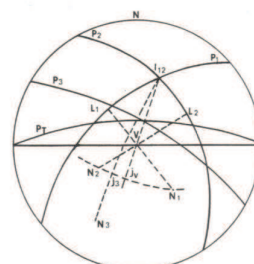
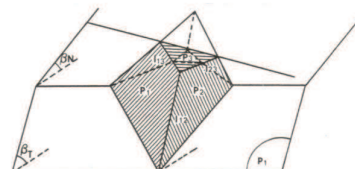
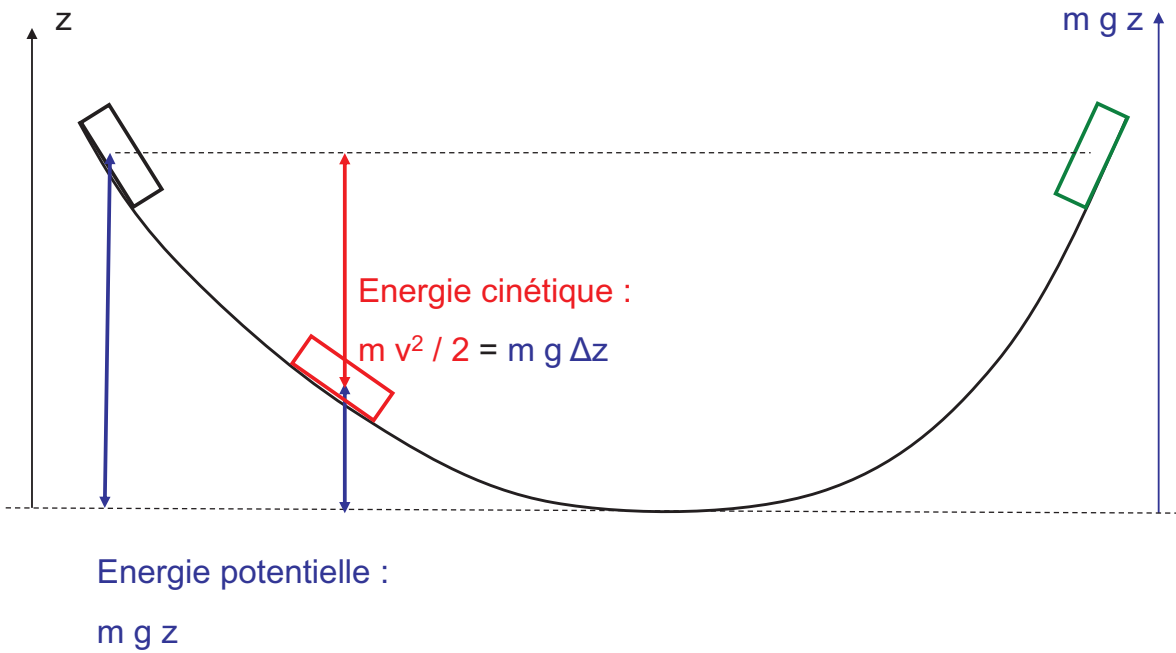


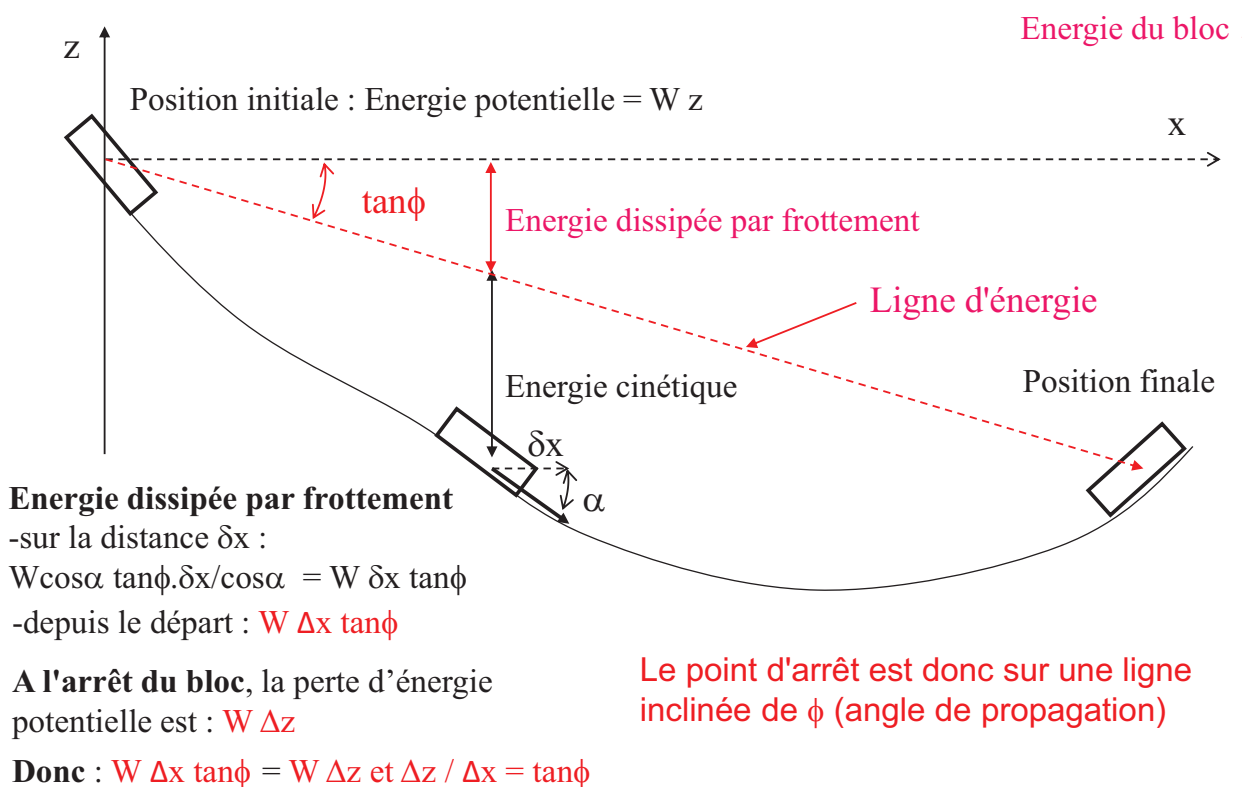
Figure 4.6. Glissement sur 2 plans d'un bloc soumis à des pressions hydrauliques (extrait de Panet et Rotheval, 1976).  $W$  : poids du bloc.  $U_r$  : résultante de la pression hydraulique sur le plan  $P_r$ .

**Propagation d'un glissement**  
cas d'un frottement nul



35

**Propagation d'un glissement**

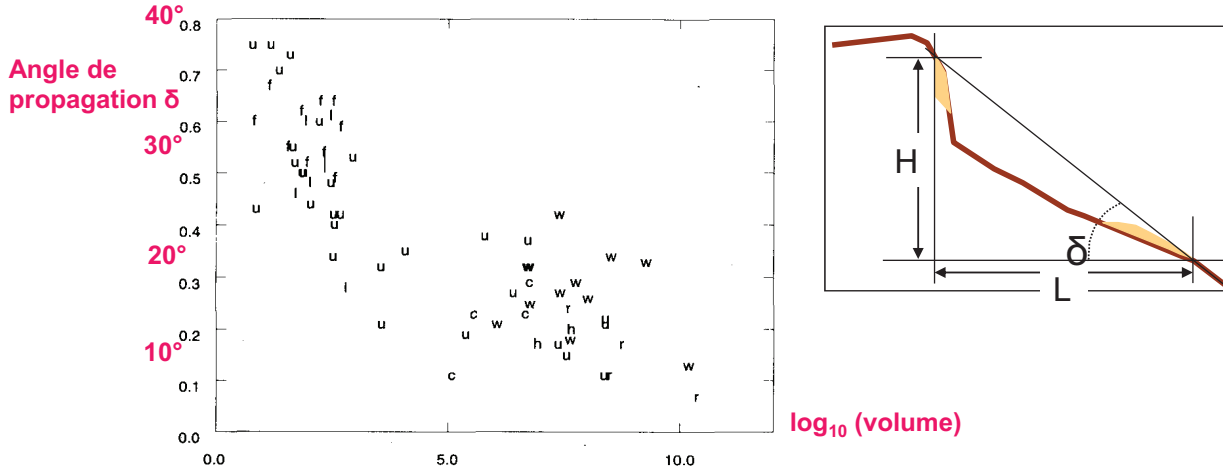


36

## Angles de propagation observés

pour 69 glissements translationnels  
(d'après Corominas, 1996, Can. Geotech. J. 33: 260-271)

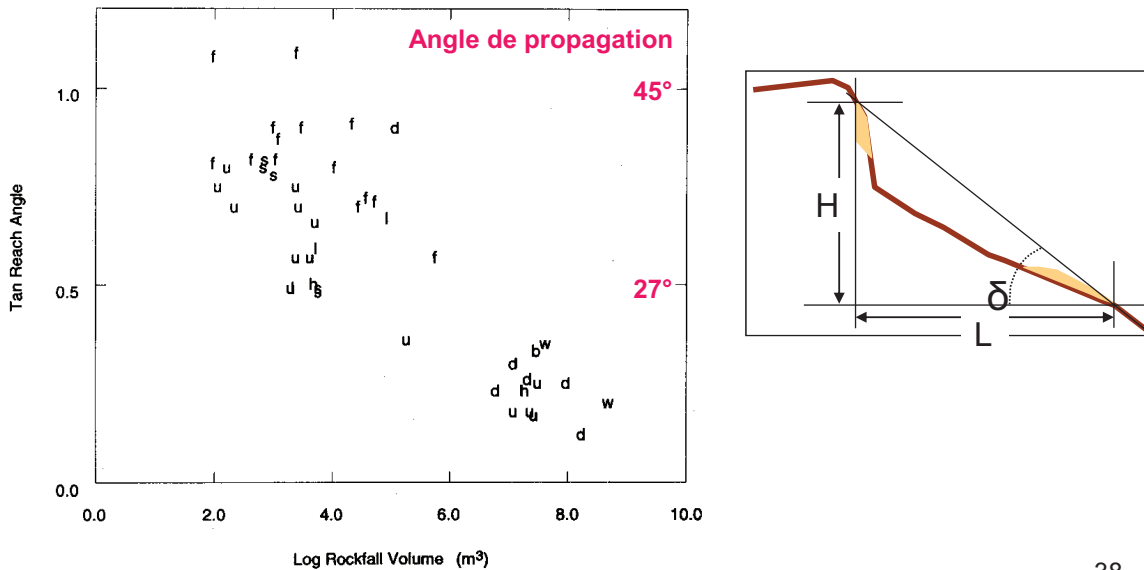
**Fig. 5.** Plot of translational slide volume versus tangent of the reach angle for 69 events. Labels correspond to obstacles and topographic constraints of the path: f, dense forest; l, open forest; c, confined; h, channeling; r, run-up over a gentle slope; w, opposing wall; u, unobstructed.



## ANGLES DE PROPAGATION OBSERVES

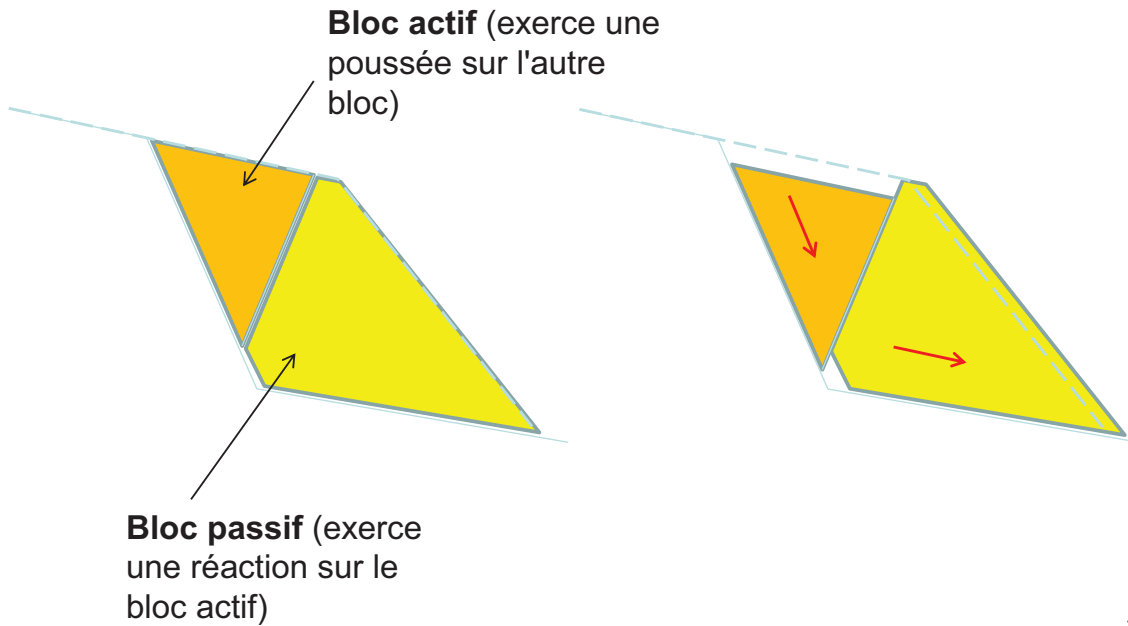
pour 47 éboulements  
(d'après Corominas, 1996, Can. Geotech. J. 33: 260-271)

**Fig. 3.** Plot of rockfall and rockfall avalanche volume versus tangent of the reach angle for 47 events. Labels correspond to obstacles and topographic constraints of the path: f, dense forest; l, open forest; s, scree deposit; b, bends; d, deflections; h, channeling; w, opposing wall; u, unobstructed.



## Glissement fractionné en 2D (compound slide)

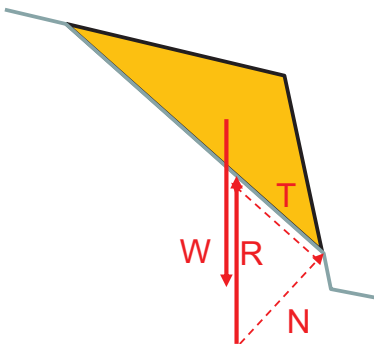
Exemple du glissement à deux blocs



39

## Glissement fractionné en 2D (compound slide)

Glissement sur un plan

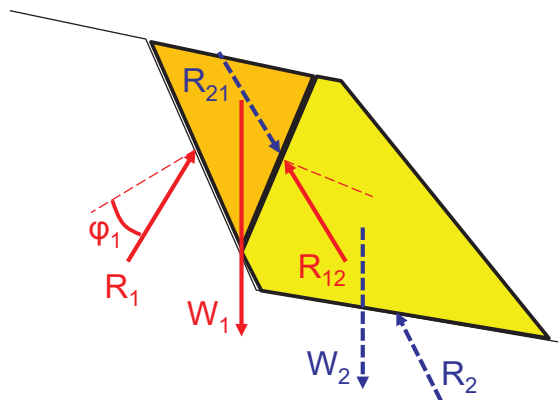


La réaction du massif peut être déterminée à partir des équations d'équilibre (en 2D, 2 équations pour 2 inconnues)

Le coefficient de sécurité  $F$  peut ensuite être déterminé :

$$F = T_{\max} / T$$

Glissement à deux blocs



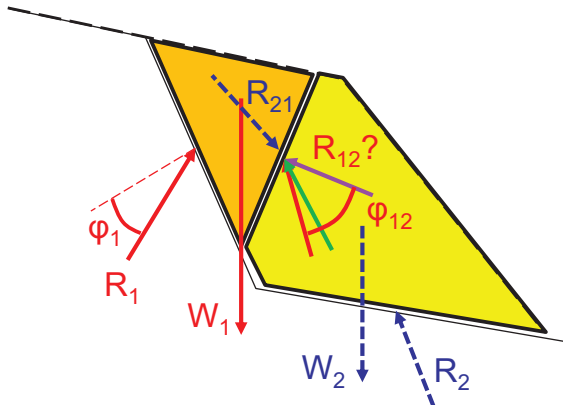
On ne peut pas calculer les réactions s'exerçant sur le bloc 1 à partir des seules équations d'équilibre (4 équations pour 6 inconnues)

Des hypothèses sont nécessaires, par exemple : les résistances des interfaces sont mobilisées dans une proportion  $1/F$  (Sarman) :

$$T_1 = T_{1\max} / F ; T_{12} = T_{12\max} / F ; T_2 = T_{2\max} / F$$

## Glissement fractionné en 2D (compound slide)

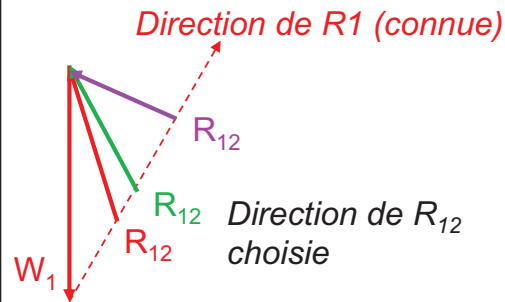
Exemple du glissement à deux blocs



Hypothèses possibles sur  $R_{12}$  :

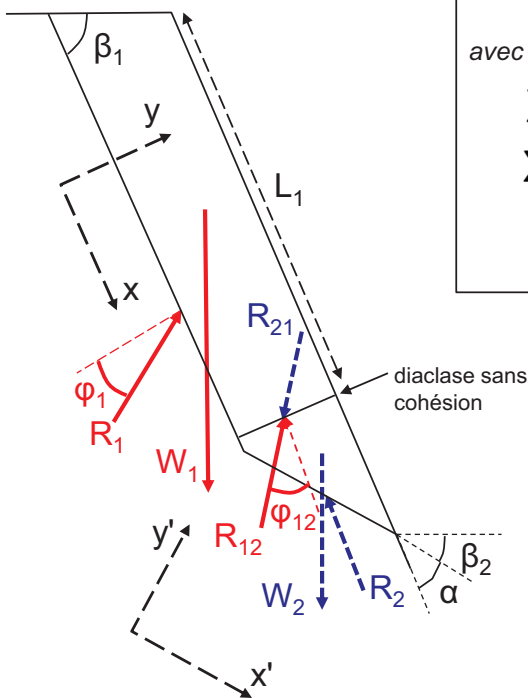
- dans la direction du mouvement du bloc 1, si possible (méthode pas à pas)
- sur le cône de frottement (Sarma)
- normale à l'interface ( $\approx$  Bishop pour un glissement rotationnel)

### Méthode graphique pour déterminer les réactions



## Glissement fractionné en 2D (compound slide)

Exemple du glissement banc sur banc à deux blocs (d'après Hawley et al., 1986)



Equilibre du bloc actif  
avec  $N_1$  et  $N_{12}$  les composantes normales des réactions  $R_1$  et  $R_{12}$

$$\sum F_x = 0 = W_1 \sin \beta_1 - (N_1 \tan \varphi_1 + c_1 L_1) - N_{12}$$

$$\sum F_y = 0 = N_1 - W_1 \cos \beta_1 + N_{12} \tan \varphi_{12}$$

d'où 
$$N_{12} = \frac{W_1 (\sin \beta_1 - \cos \beta_1 \tan \varphi_1) - c_1 L_1}{1 - \tan \varphi_{12} \tan \varphi_1}$$

Equilibre du bloc passif  
avec  $N_2$  la composante normale de  $R_2$

$$\sum F_{x'} = 0 = W_2 \sin \beta_2 - \frac{(N_2 \tan \varphi_2 + c_2 L_2)}{F} + N_{21} \cos \alpha - N_{21} \sin \alpha \tan \varphi_{12}$$

$$\sum F_{y'} = 0 = -W_2 \cos \beta_2 + N_2 - N_{21} \sin \alpha - N_{21} \cos \alpha \tan \varphi_{12}$$

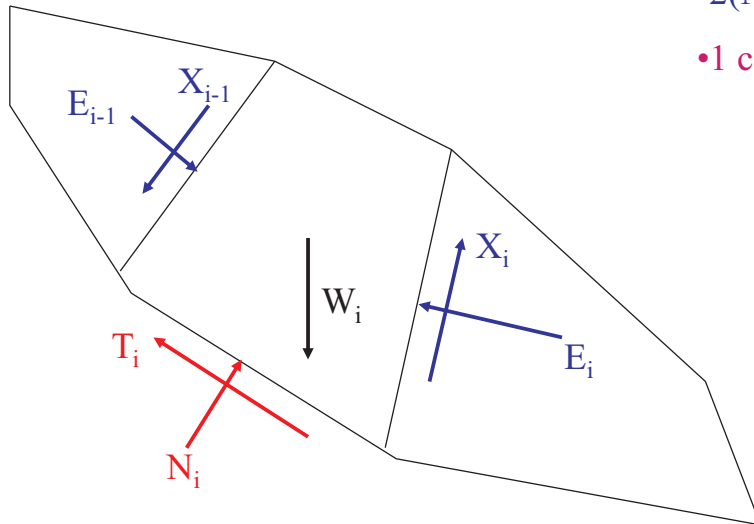
d'où l'expression du coefficient de sécurité  $F_2$

**Glissement fractionné en 2D (compound slide)**

Equilibre de N blocs susceptibles de glisser  
(équilibre des forces)

(4N-1) inconnues

- 2N forces (bases)
- 2(N-1) forces (interfaces)
- 1 coefficient de sécurité



(4N-1) équations

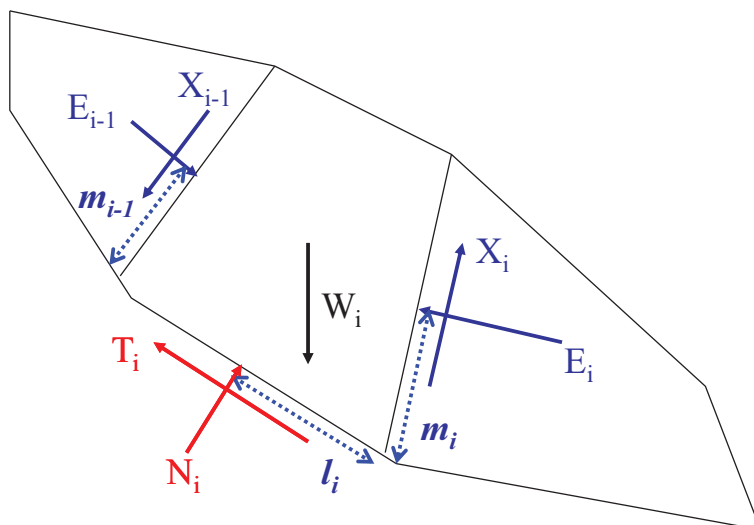
- 2N équations d'équilibre
- N équations (bases):  
 $T_i = (C_i + N_i \tan \phi_i) / F$
- (N-1) équations (interfaces)

**Glissement fractionné en 2D (compound slide)**

Equilibre de N blocs susceptibles de glisser  
(équilibre des forces et des moments)

(6N-2) inconnues

- 2N forces (bases)
- 2(N-1) forces (interfaces)
- 1 coefficient de sécurité
- N distances  $l_i$
- (N-1) distances  $m_i$



(5N-1) équations

- 2N équations d'équilibre
- N équations (bases)
- (N-1) équations (interfaces)
- N équations (moments)

*Nécessité de (N-1) hypothèses (portant généralement sur les  $m_i$ )*

# Glissements fractionnés dans les massifs rocheux

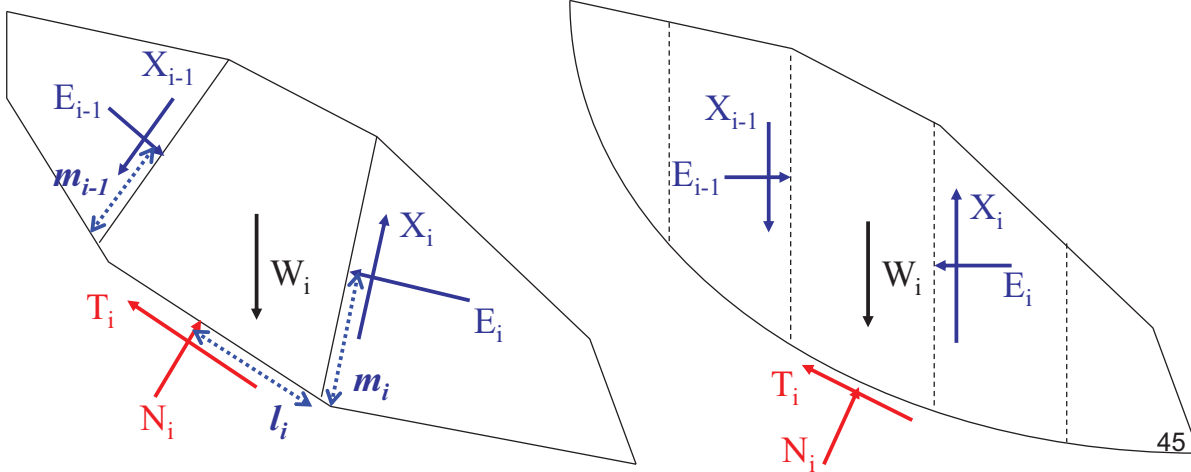
Masse découpée en compartiments par les discontinuités

- Sarma:  $X_i = (E'_i \tan\phi_i + C_i)/F$
- Panet et Rotheval: force interblochs parallèle à la base si  $X_i < E'_i \tan\phi_i + C_i$

# Glissements dans les sols

Masse découpée en tranches fictives

- Fellenius: forces intertranches parallèles à la base
- Bishop: forces intertranches horizontales ( $X_i = 0$ )
- Sarma



## Analyse de stabilité

### ANALYSE DE LA STABILITÉ AU GLISSEMENT D'UNE MASSE ROCHÉUSE NON MONOLITHIQUE

L'analyse de la stabilité d'une masse rocheuse constituée de plusieurs blocs jointifs, susceptibles de glisser suivant une surface polyédrique, suppose des hypothèses supplémentaires relatives aux interactions des blocs entre eux. On peut faire des hypothèses analogues à celles qui sont faites en mécanique des sols pour l'analyse des ruptures non circulaires par la méthode des tranches.

Une autre méthode consiste à faire une analyse pas à pas de la stabilité des différents blocs en commençant par les blocs les plus hauts. On analyse les conditions de stabilité du bloc le plus haut supposé sans interaction avec les blocs inférieurs ; s'il est stable l'interaction est prise égale à zéro, sinon on suppose le bloc en équilibre limité, on calcule alors la réaction sur les blocs inférieurs et on passe à l'étude de la stabilité de ceux-ci en tenant compte des réactions des blocs situés en amont.

La figure 1) donne un exemple d'une telle analyse sur un cas théorique pour une masse rocheuse composée de trois blocs ; l'analyse est faite à deux dimensions ; les niveaux d'eau dans les fissures  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$  permettent de déterminer les sous-pressions  $U_1, \dots, U_6$ .

On suppose une répartition linéaire des pressions interstitielles dans les plans  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ . La résistance au cisaillement le long des discontinuités  $F_i$  est donnée par un angle de frottement  $\phi_i$ , la cohésion étant égale à zéro. La fissure  $F_1$  est une fissure de traction ouverte, il n'y a donc pas d'interaction avec la masse rocheuse située au-dessus. L'analyse de la stabilité du bloc (a) permet de déterminer la réaction  $R_1$  du bloc (b) nécessaire à assurer l'équilibre limite. Pour cela on fait l'hypothèse que  $R_1$  est dirigée dans la direction de glissement du bloc (a) et inclinée de  $\delta_1$  sur l'horizontale ; cette direction est compatible avec l'angle de frottement  $\phi_1$ . Connaissant  $R_1$ , le polygone des forces à l'équilibre limite pour le bloc (b) donne  $R_2$  ;  $R_2$  ne peut pas avoir la direction de glissement du bloc (b) car cette direction est extérieure au cône de frottement du plan  $F_2$  ; on choisit donc la direction limite donnée par l'angle de frottement  $\phi_2$  ; en cas de mouvement les deux blocs coulissent selon le plan  $F_2$ . Connaissant  $R_2$  on étudie alors la stabilité du bloc (c) ; le coefficient de sécurité est donné par :

$$F = \frac{\tan\phi_3}{\tan\delta_3}$$

où :

$$\tan\delta_3 = \frac{|R_2| \sin(\beta_3 - \phi_2) + |U_2| \sin\beta_3 + |U_3| \sin\beta_4}{|W_b| + |R_1| \cos(\beta_2 - \phi_1) + |U_1| \cos\beta_2 - |U_4| \cos\beta_4}$$

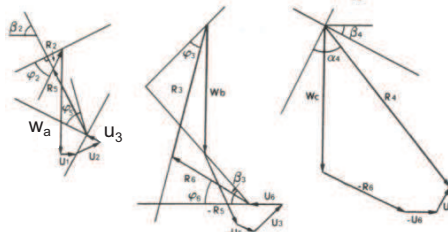
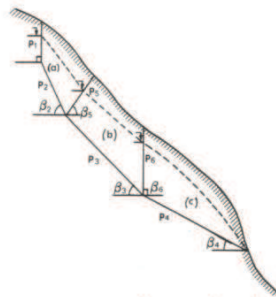
$R_2$  est déterminé à partir des deux équations vectorielles :

$$(1) \vec{U}_6 - \vec{R}_5 - \vec{U}_5 + \vec{U}_3 + \vec{U}_2 + \vec{R}_3 + \vec{W}_3 = 0$$

$$(2) \vec{U}_6 + \vec{U}_1 + \vec{U}_2 + \vec{R}_5 + \vec{R}_2 = 0$$

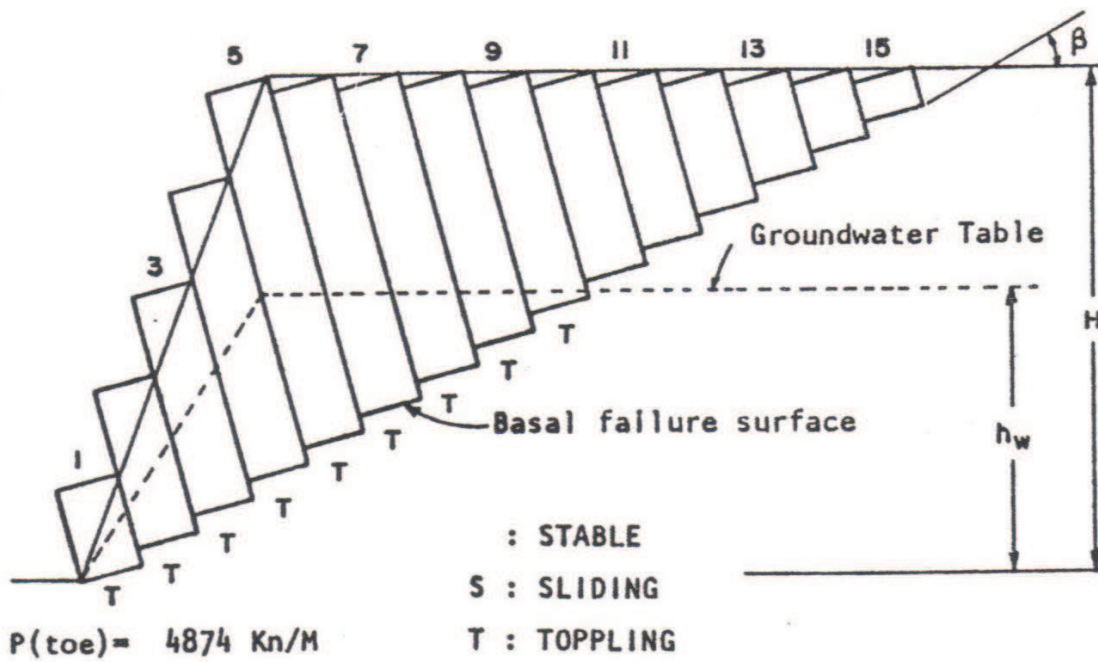
Sur le même principe, il est possible de faire des analyses tridimensionnelles ; bien qu'elles soient plus complexes, il est possible d'en venir à bout. Cependant la multiplication de blocs et de faces entraînent une multiplication des paramètres et il devient difficile d'utiliser le coefficient de sécurité. Il ne faut pas perdre de vue que le coefficient de sécurité doit être considéré essentiellement comme un outil d'analyse.

## Glissement fractionné en 2 dimensions (extrait de Panet et Rotheval, 1976)



## Glissement et basculement

LIMIT EQUILIBRIUM ANALYSIS OF TOPPLING FAILURE IN JOINTED ROCK

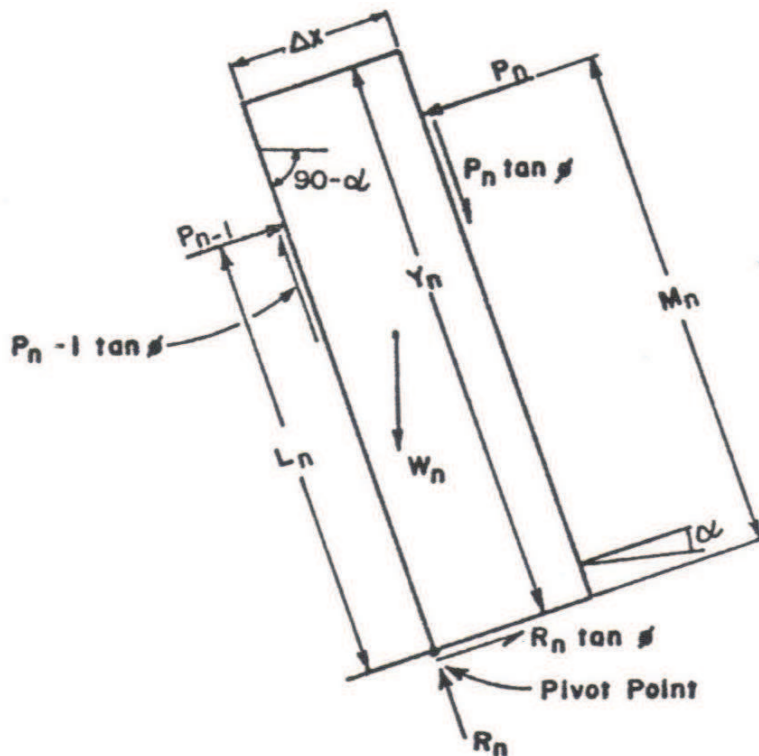


a) Model for limit equilibrium analysis of toppling.

47

## Glissement et basculement

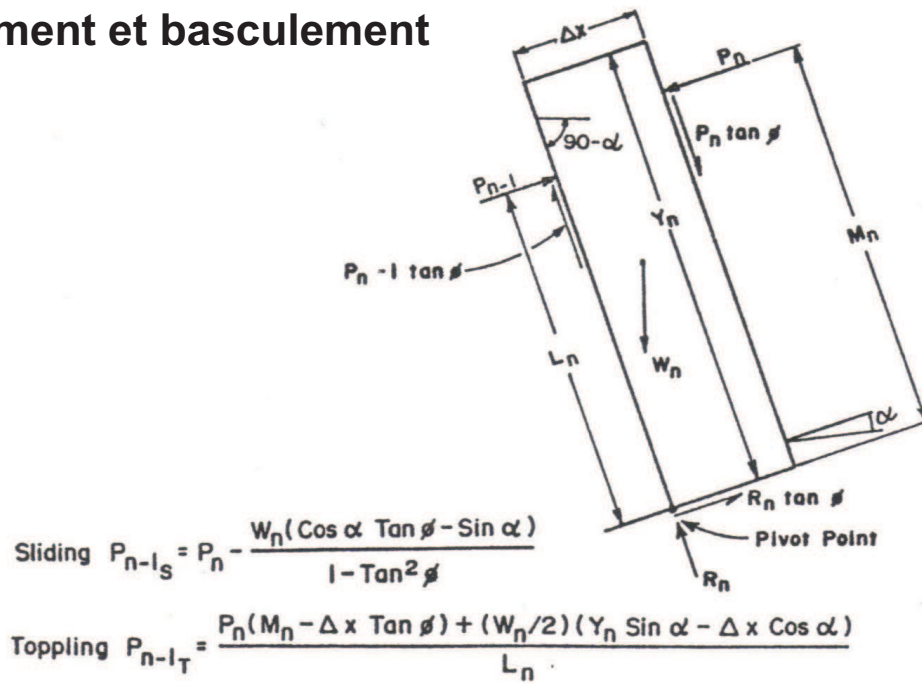
Condition d'équilibre du bloc n au glissement et au basculement ?



48



## Glissement et basculement



b) Conditions for toppling and sliding of the nth block (after Goodman and Bray 1976).

49

## Écoulement dans un joint

Pour les écoulements naturels, on considère généralement un régime laminaire. Si les épontes sont lisses, la vitesse dans une fracture continue, d'épaisseur  $e$ , est :

$$V = \frac{ge^2 i}{12\nu} \quad \text{ou} \quad V = \frac{\rho ge^2 i}{12\eta}$$

$i$  : gradient hydraulique

$\nu$  : viscosité cinématique du fluide [ $m^2.s^{-1}$ ]

$\rho$  : masse volumique du fluide

$\eta$  : viscosité dynamique du fluide [ $Pa.s$ ]

$(ge^2/12\nu)$  est la conductivité hydraulique (ou perméabilité) de la fracture

Le débit traversant une largeur unitaire de fracture d'épaisseur  $e$  est donc :

$$Q = \frac{ge^3 i}{12\nu}$$

50

## **Ecoulement dans un joint**

Si les épontes sont rugueuses :

$$Q = \frac{ge^3i}{12\nu C}$$

$C = 1$  pour  $h/2e < 0,033$   
 $C = 1 + 8,8 (h/2e)^{1,5}$  pour  $h/2e > 0,033$   
 $h$  : hauteur des aspérités

Si la fracture comporte des surfaces de contact ou des ponts rocheux :

$$Q = \frac{\tau ge^3i}{12\nu C}$$

$\tau$  : rapport entre la surface de fracture accessible à l'écoulement et la surface totale <sub>51</sub>



## Stabilité des massifs fracturés

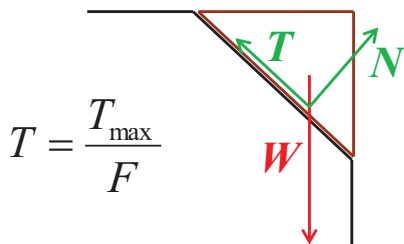
### Seconde partie Méthodes d'éléments discrets

Didier Hantz  
2017

1

#### Analyse de la stabilité d'un massif fracturé

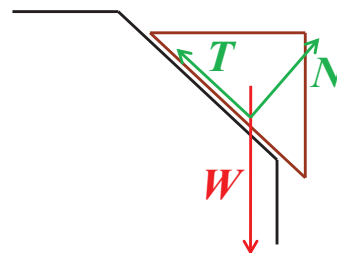
Méthode de l'équilibre limite



*On cherche par quel coefficient  $F$  il faut diviser les résistances pour que le massif soit en équilibre limite.*

- Si  $F > 1$ , le massif est stable
- Si  $F < 1$ , le massif est instable

Méthodes dynamiques



*On calcule les mouvements des blocs.*

- Si les déplacements sont acceptables, le massif est considéré comme stable
- Sinon, la méthode permet de prévoir les trajectoires des blocs jusqu'à leur stabilisation

2

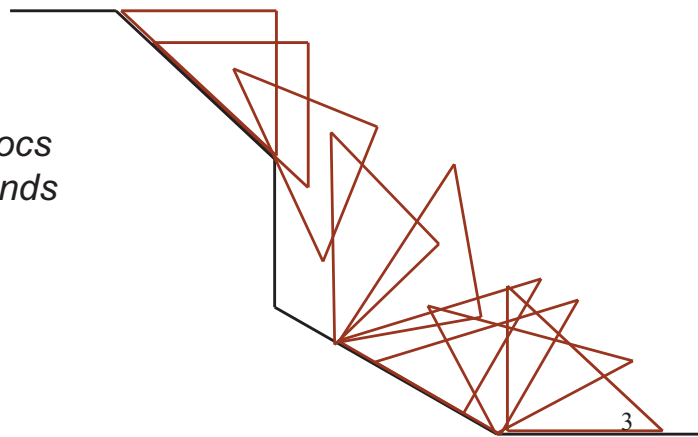
## Méthodes dynamiques

### Méthodes numériques (méthodes d'éléments discrets)

- permettent de simuler les déplacements et les rotations des blocs (rigides ou déformables)
- reconnaissent automatiquement les nouveaux contacts entre blocs
- actualisent à chaque pas de temps les forces de contact entre blocs

### Méthodes analytiques

- limitées à un ou quelques blocs
- traitement simplifié des rebonds



## Méthode des éléments discrets Principe

**Equation du mouvement (translation)** d'un solide de masse  $m$  soumis à une force résultante  $F$  variable:

$$\frac{d\dot{u}_i}{dt} = \frac{F_i(t)}{m}$$

$\dot{u}_i$ : vitesse dans la direction  $i$ ;  $F_i$ : composante de  $F$  dans la direction  $i$

**Intégration** par un schéma de différence centré

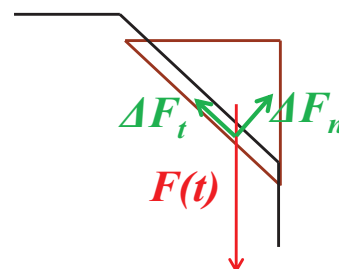
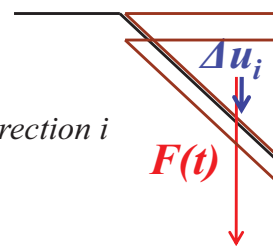
$$\left(\frac{d\dot{u}_i}{dt}\right)^t = \frac{\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)}}{\Delta t}$$

$$\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} + \frac{F_i^{(t)}}{m} \Delta t$$

$$\Delta u_i = u_i^{(t+\Delta t)} - u_i^{(t)} = \dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t$$

$\Delta F = f(\Delta u)$  (Loi de comportement du joint ou du point de contact)

*Exemple*

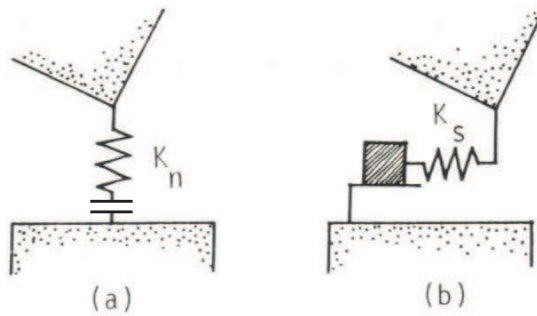


$$F(t+\Delta t) = F(t) + \Delta F$$

## Méthode des éléments discrets Principe

### Loi de comportement du joint ou du point de contact

*Représentation schématique*



*Critères de rupture ou plasticité, en traction et cisaillement*

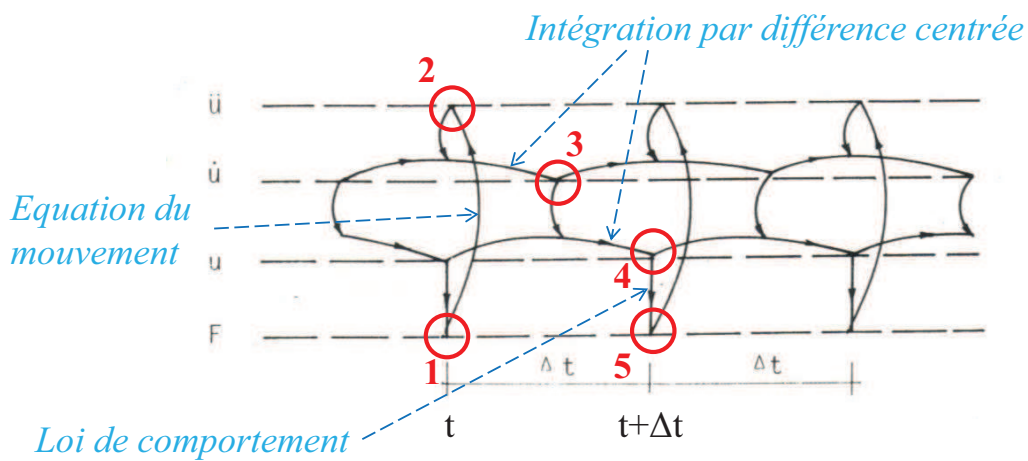
$$\Delta F_n = K_n \Delta u_n$$

$$\Delta F_s = K_s \Delta u_s$$

$K_n$  et  $K_s$  dépendent de l'état du joint (élastique ou plastique)

5

## Méthode des éléments discrets Principe



6

## Méthode des éléments discrets Principe

**Equation du mouvement (rotation)** d'un bloc de moment d'inertie  $I$  soumis à un moment résultant  $M$  (2D):

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = \frac{M(t)}{I}$$

$\dot{\theta}$  : vitesse de rotation

**Intégration** par un schéma de différence centré

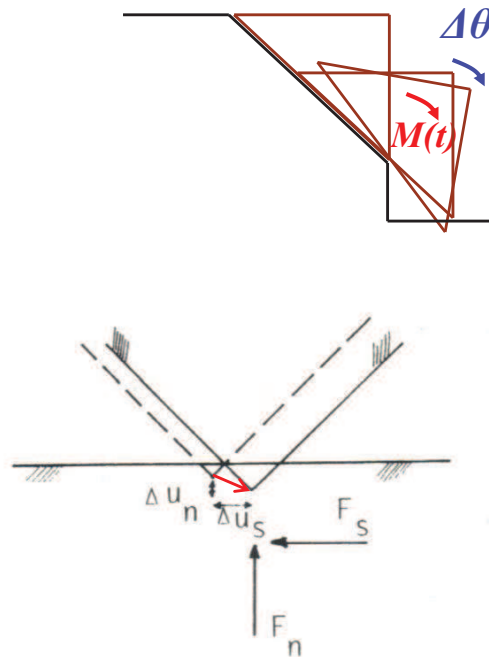
$$\dot{\theta}^{(t+\Delta t/2)} = \dot{\theta}^{(t-\Delta t/2)} + \frac{M^{(t)}}{I} \Delta t$$

$$\Delta\theta = \theta^{(t+\Delta t)} - \theta^{(t)} = \dot{\theta}^{(t+\Delta t/2)} \Delta t$$

Calcul des déplacements des coins du bloc

$\Delta F = f(\Delta u)$  (Loi de comportement du joint ou du point de contact)

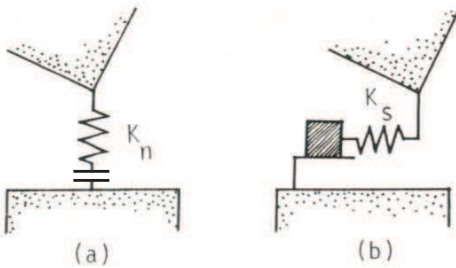
*Exemple*



7

## Méthode des éléments discrets Principe

**Loi de comportement du joint ou du point de contact**



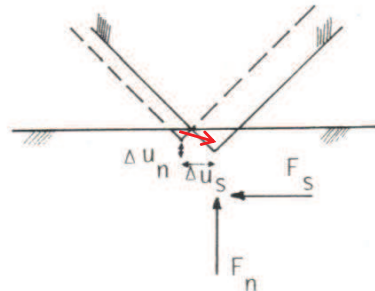
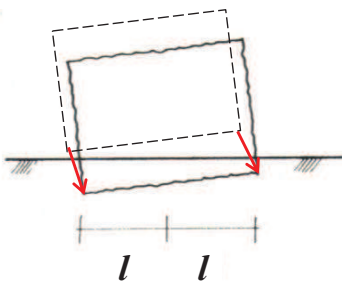
$$\Delta\sigma_n = \Delta F_n / l = k_n \Delta u_n$$

$$\Delta\sigma_s = \Delta F_s / l = k_s \Delta u_s$$

$k_n$  et  $k_s$  dépendent de l'état du joint (élastique ou plastique)

*Contact face-face*

*Contact coin-face: surface minimale imposée*



Ordres de grandeur pour des joints peu altérés en roche dure.  $k_n$  :  $10^{10}$  Pa/m ;  $k_s$  :  $10^9$  Pa/m

8

# Méthode des éléments discrets

## Principe

### Modélisation tridimensionnelle

**Equation du mouvement (rotation)** d'un bloc de tenseur d'inertie ( $I_{ij}$ ) soumis à des moments  $M_j$  :

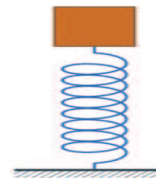
$$\frac{d\dot{\theta}_i}{dt} = \sum_j M_j I_{ij}^{-1}$$

$\theta_i$  : vitesse de rotation

9

## Méthode des éléments discrets - Principe

### Amortissement



*Il est nécessaire d'introduire un amortissement, sinon les blocs oscilleraient indéfiniment.*

*Cet amortissement peut être introduit dans l'équation du mouvement des blocs ou au niveau des contacts.*

*Dans le premier cas, l'équation du mouvement en translation devient:*

$$\frac{d\dot{u}_i}{dt} + \alpha \dot{u}_i = \frac{F_i(t)}{m}$$

$\dot{u}_i$  : vitesse dans la direction  $i$

**Intégration** par un schéma de différence centré

$$\left(\frac{d\dot{u}_i}{dt}\right)^t = \frac{\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)}}{\Delta t} \quad \dot{u}_i^t = \frac{\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} + \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)}}{2}$$

$$\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} \frac{(1 - \alpha\Delta t/2)}{(1 + \alpha\Delta t/2)} + \frac{F_i}{m} \frac{\Delta t}{(1 + \alpha\Delta t/2)}$$

*L'équation du mouvement en rotation s'obtient de la même manière*

10

## Méthode des éléments discrets - Principe

### Choix du pas de temps $\Delta t$

*$\Delta t$  doit être inférieur à la période de résonance la plus courte sur l'ensemble des blocs*

*Dans le code UDEC, le pas de temps maximal est donné par la formule:*

$$\Delta t_{max} = 2 f (M_{min} / K_{max})^{1/2}$$

*$M_{min}$  : plus petite masse de bloc*

*$K_{max}$  : plus grande raideur de contact*

*$f$  : paramètre fixé par l'utilisateur (valeur typique : 0,1)*

*Rappel*

*Période d'un oscillateur simple =  $2\pi (M/K)^{1/2}$*

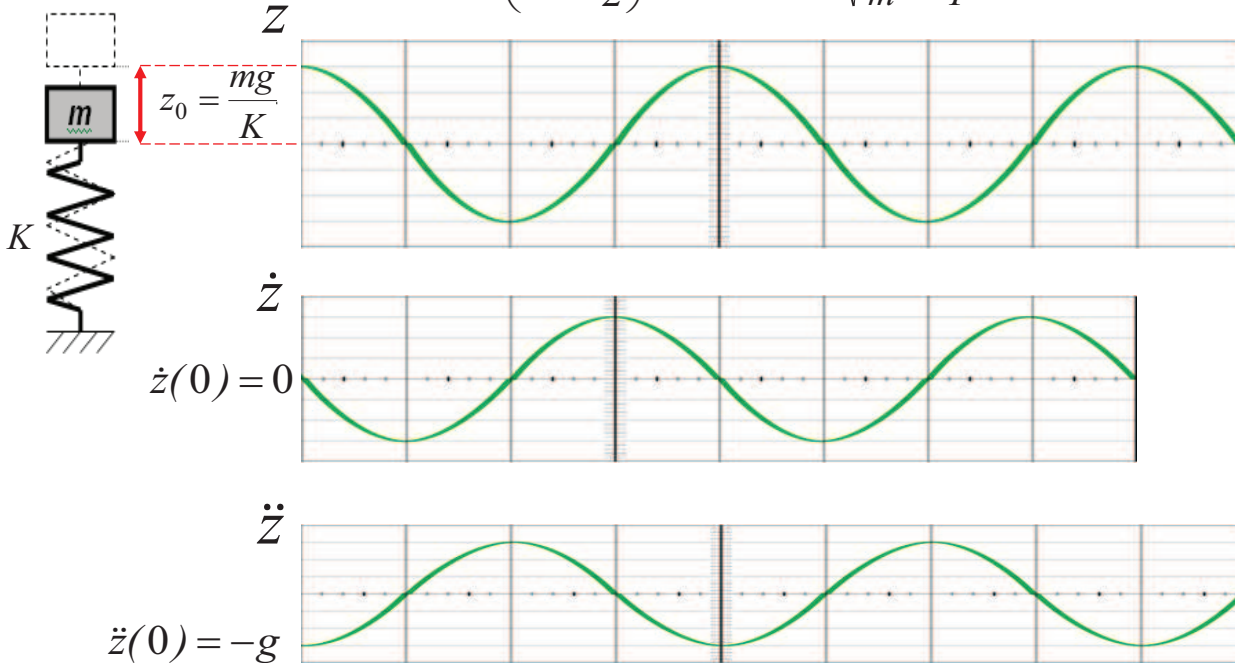
*(Voir sur Wikipedia : système oscillant à un degré de liberté)*

11

## Méthode des éléments discrets - Principe

### Oscillateur harmonique sans amortissement

$$z = z_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad \omega = \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{2\pi}{T}$$



12

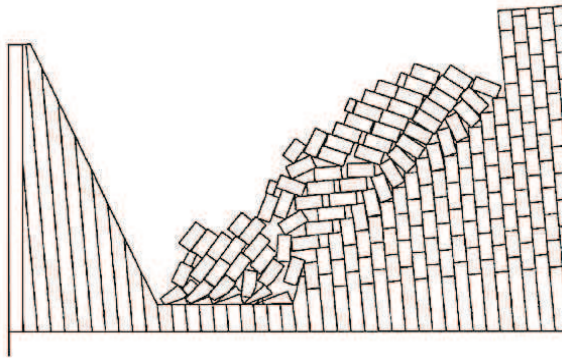


# Méthode des éléments discrets - Applications

## 1. Etude de la stabilité d'un massif rocheux

Le coefficient de sécurité peut être calculé en utilisant la méthode de réduction de la résistance (*on divise la résistance par un coefficient  $F$  que l'on augmente jusqu'à obtenir la rupture*).

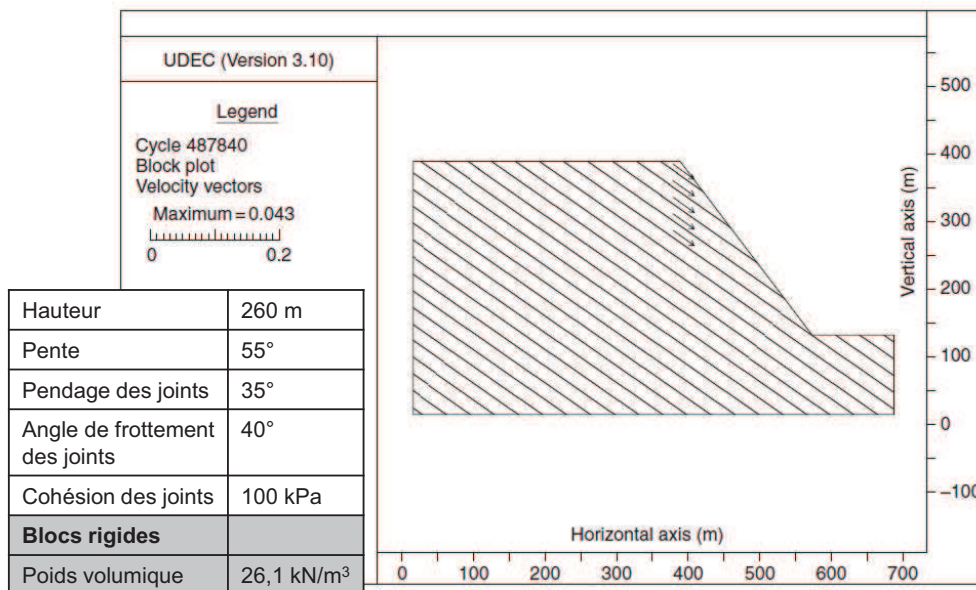
## 2. Simulation du mouvement des blocs



13

## Méthode des éléments discrets Simulation d'un glissement sur un plan (blocs rigides)

(extrait de Rock Slope Engineering (Wyllie & Mah, 2004))



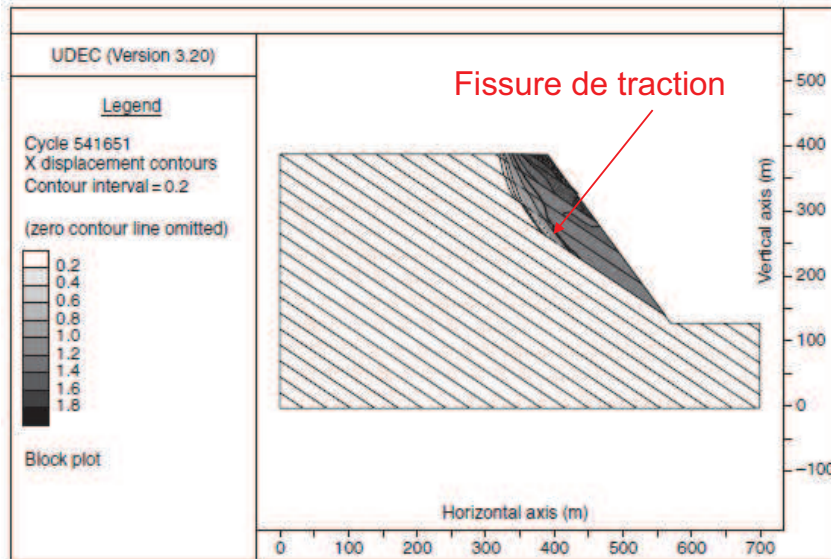
|                               |                 |                            |
|-------------------------------|-----------------|----------------------------|
| Méthode des éléments discrets | <b>F = 1,32</b> |                            |
| Méthode de l'équilibre limite | <b>F = 1,32</b> | plus simple et plus rapide |

14

## Méthode des éléments discrets Simulation d'un glissement sur un plan (blocs déformables)

(extrait de Rock Slope Engineering (Wyllie & Mah, 2004))

|   |                        |
|---|------------------------|
| Hauteur   | 260 m                  |
| Pente   | 55°                    |
| Pendage <b>des joints</b>   | 35°                    |
| Angle de frottement   | 40°                    |
| Cohésion  | 100 kPa                |
| Poids volumique <b>du massif</b>                                  | 26,1 kN/m <sup>3</sup> |
| Angle de frottement   | 43°                    |
| Cohésion  | 675 kPa                |
| Résistance en traction  | 0                      |
| K   | 6,3 GPa                |
| G   | 3,6 GPa                |
| La déformation des blocs est simulée par <b>différence finies</b> |                        |



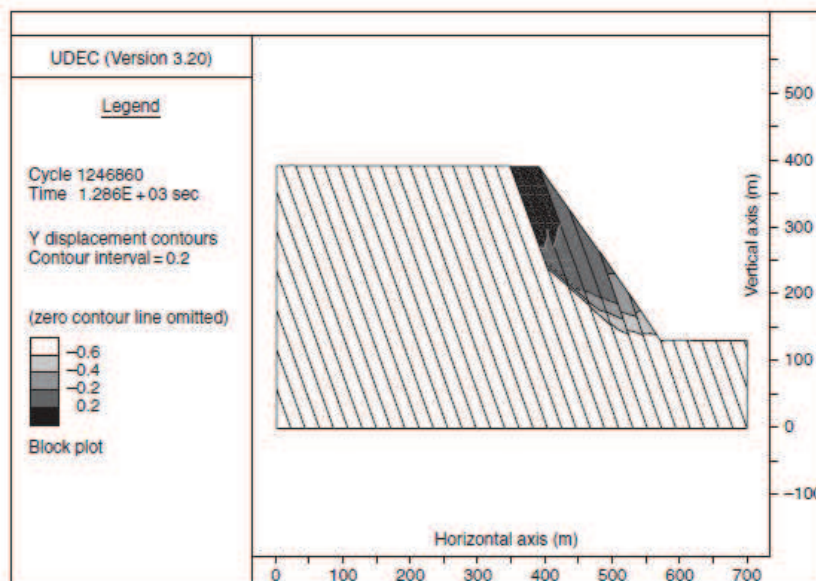
|  |                 |                            |
|--|-----------------|----------------------------|
| Méthode des éléments discrets                                    | <b>F = 1,27</b> |                            |
| Méthode de l'équilibre limite avec fissure de traction verticale | <b>F = 1,30</b> | plus simple et plus rapide |

15

## Méthode des éléments discrets Simulation d'un glissement avec rupture du massif (blocs déformables)

(extrait de Rock Slope Engineering (Wyllie & Mah, 2004))

|   |                        |
|---|------------------------|
| Hauteur   | 260 m                  |
| Pente   | 55°                    |
| Pendage <b>des joints</b>   | 70°                    |
| Espacement des joints   | 20 m                   |
| Angle de frottement   | 40°                    |
| Cohésion  | 0                      |
| Poids volumique <b>du massif</b>                                  | 26,1 kN/m <sup>3</sup> |
| Angle de frottement   | 43°                    |
| Cohésion  | 675 kPa                |
| Résistance en traction  | 0                      |
| K   | 6,3 GPa                |
| G   | 3,6 GPa                |
| La déformation des blocs est simulée par <b>différence finies</b> |                        |



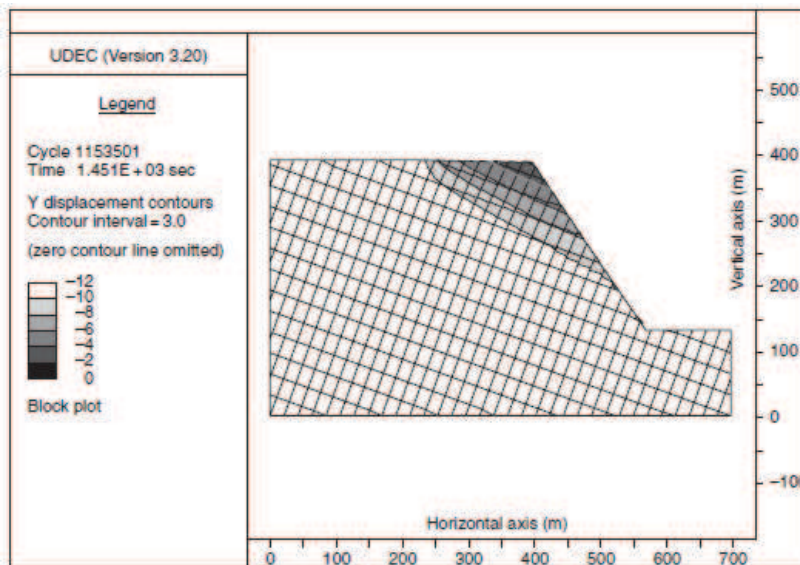
|                               |                                    |
|-------------------------------|------------------------------------|
| Méthode des éléments discrets | <b>F = 1,5</b>                     |
| Méthode de l'équilibre limite | ne simule pas la rupture du massif |

16

## Méthode des éléments discrets Simulation d'un basculement (blocs rigides)

(extrait de Rock Slope Engineering (Wyllie & Mah, 2004))

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| Hauteur                        | 260 m                  |
| Pente                          | 55°                    |
| Pendage des joints 1           | 70°                    |
| Espacement                     | 20 m                   |
| Pendage des joints 2           | 20°                    |
| Espacement                     | 30 m                   |
| Angle de frottement des joints | 40°                    |
| Cohésion des joints            | 100 kPa                |
| <b>Blocs rigides</b>           |                        |
| Poids volumique                | 26,1 kN/m <sup>3</sup> |



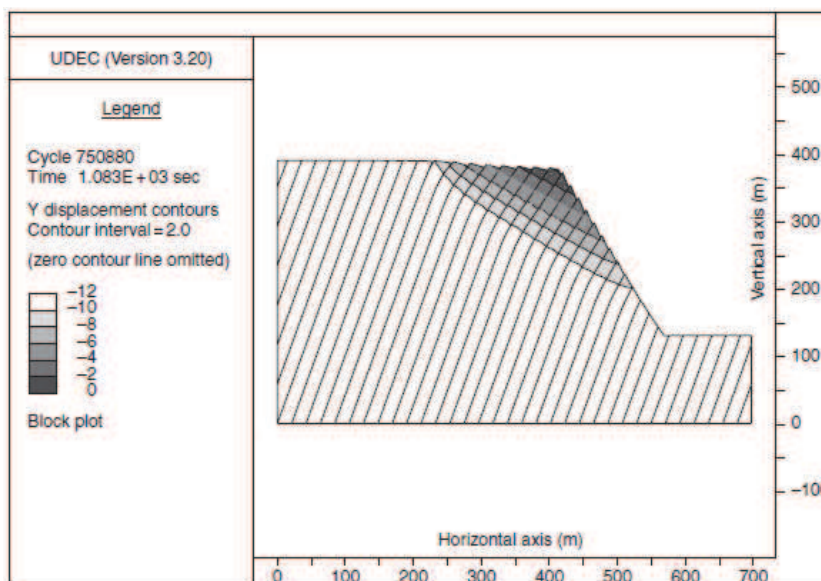
|                               |                 |
|-------------------------------|-----------------|
| Méthode des éléments discrets | <b>F = 1,13</b> |
| Méthode de l'équilibre limite | inadéquat       |

17

## Méthode des éléments discrets Simulation d'un basculement par flexion (blocs déformables)

(extrait de Rock Slope Engineering (Wyllie & Mah, 2004))

|   |                        |
|---|------------------------|
| Hauteur   | 260 m                  |
| Pente   | 55°                    |
| Pendage <b>des joints</b>   | 70°                    |
| Espacement des joints   | 20 m                   |
| Angle de frottement   | 40°                    |
| Cohésion  | 0                      |
| Poids volumique <b>du massif</b>  | 26,1 kN/m <sup>3</sup> |
| Angle de frottement   | 43°                    |
| Cohésion  | 675 kPa                |
| Résistance en traction  | 0                      |
| K   | 6,3 GPa                |
| G   | 3,6 GPa                |
| La déformation des blocs est simulée par <b>différence finies (maillage suffisamment fin)</b> |                        |



|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Méthode des éléments discrets | <b>F = 1,3 (diminue avec l'espacement des joints)</b> |
| Méthode de l'équilibre limite | ne simule pas la déformation du massif                |

18

## Méthode des éléments discrets Simulation d'un basculement arrière (blocs rigides)

(extrait de Rock Slope Engineering (Wyllie & Mah, 2004))

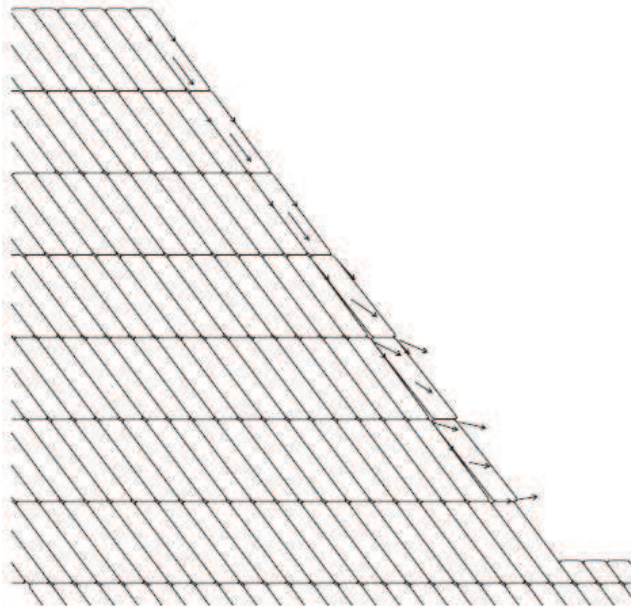


Figure 10.11 Reverse (backward) block toppling failure mode determined with UDEC; arrows show movement vectors.

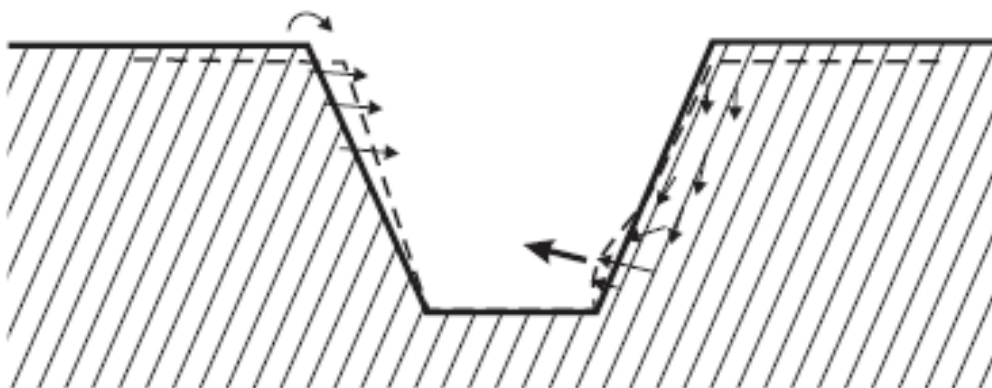
|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| Hauteur                        | 260 m                  |
| Pente                          | 55°                    |
| Pendage des joints 1           | 55°                    |
| Espacement                     | 10 m                   |
| Pendage des joints 2           | 0°                     |
| Espacement                     | 40 m                   |
| Angle de frottement des joints | 40°                    |
| Cohésion des joints            | 100 kPa                |
| <b>Blocs rigides</b>           |                        |
| Poids volumique                | 26,1 kN/m <sup>3</sup> |

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| Méthode des éléments discrets | <b>F = 1,7</b> |
| Méthode de l'équilibre limite | inadéquat      |

19

## Méthode des éléments discrets Instabilités par flexion-basculement (à gauche) et flambage (à droite)

Ces modes peuvent être simulés par éléments discrets, avec un maillage des bancs suffisamment fin



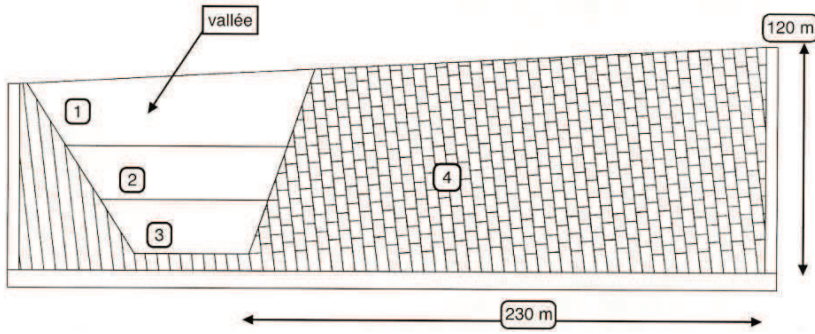
(d'après Adhikary *et al.*, 2001)

20

## Méthode des éléments discrets

### Exemple de simulation d'une rupture par basculement de blocs

(d'après Alfonsi et al., 1998, Bull. des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 214, pp.31-43)



#### Modèle initial

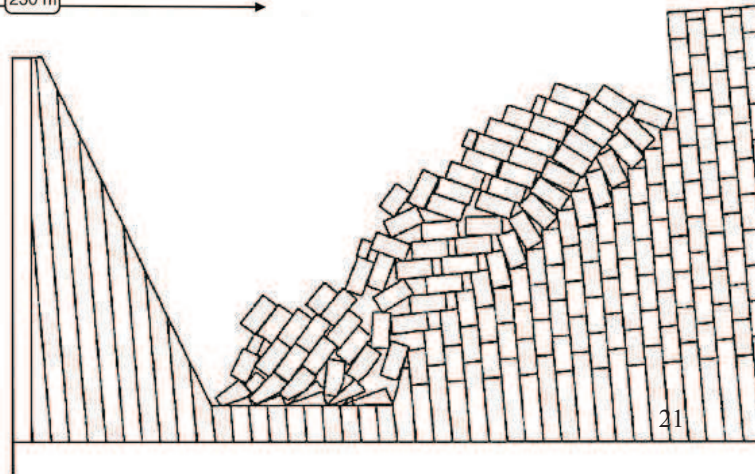
(avant excavation de la vallée).

Pente du futur versant :  $75^\circ$

Pendage des strates :  $85^\circ$ .

#### Simulation jusqu'à stabilisation.

Angle de frottement :  $25^\circ$ .



## Méthode des éléments discrets (avec blocs déformables)

### Exemple de simulation de basculement par flexion

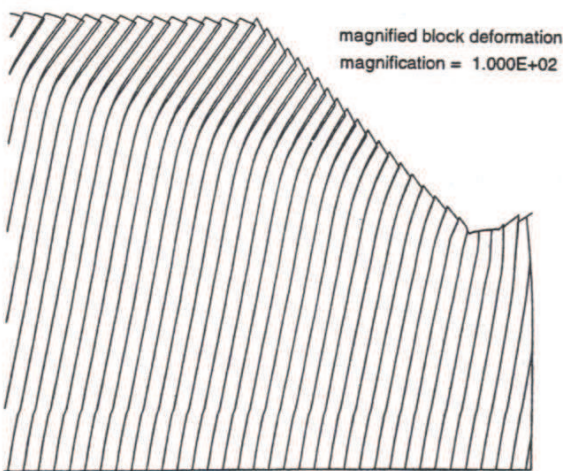


Figure 5. Calculated block movements using UDEC (magnified 100 times) for a 300-meter deep pit with a  $40^\circ$  slope angle, with steeply dipping joints ( $80^\circ$ ). (Entire model not shown.)

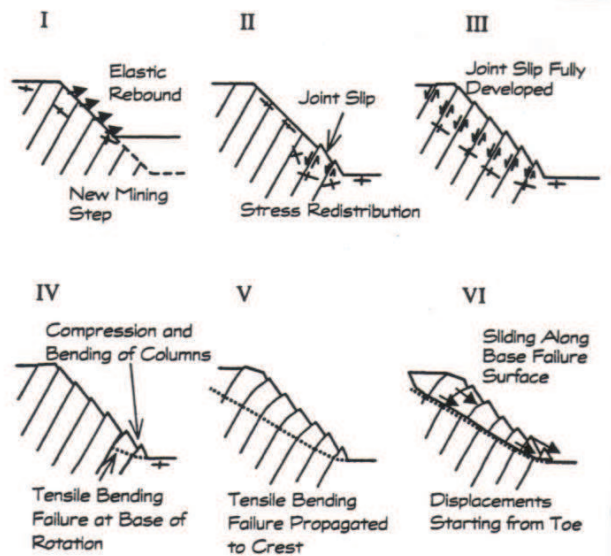
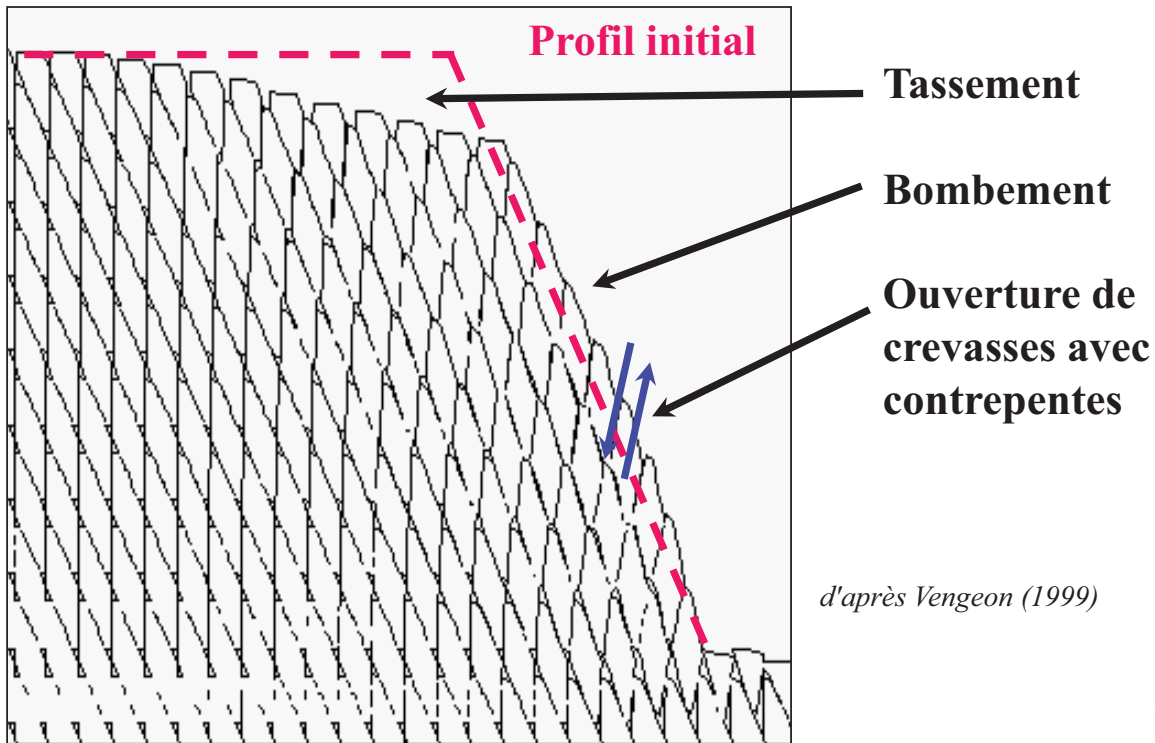


Figure 6. Failure stages for large scale toppling failure in a slope.

## Modélisation de la déformation du versant de Séchilienne après la fonte du glacier (méthode des éléments distincts) déplacements amplifiés



23

## Méthode des éléments discrets Discontinuités non persistantes (Scholtes et Donze, 2012)

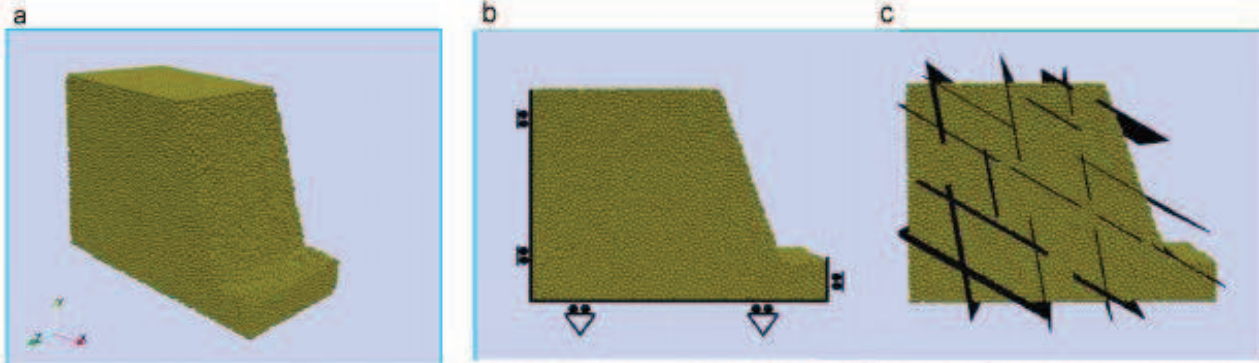


Fig. 15. (a) Three dimensional view of the slope used in this study, (b) boundary conditions and (c) joint pattern.

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| Hauteur                       | A20 m                  |
| Pente                         | 70°                    |
| Pendage des joints            | 30° et 80°             |
| Angle de frottement           | 25°                    |
| Cohésion                      | 0                      |
| Angle de dilatace             | 5°                     |
| Masse volumique               | 2500 kg/m <sup>3</sup> |
| Angle de frottement           | 41,3°                  |
| <b>Cohésion initiale</b>      | <b>15,5 MPa</b>        |
| <b>Résistance en traction</b> | <b>4,5 MPa</b>         |
| E                             | 50 GPa                 |
| v                             | 0,25                   |

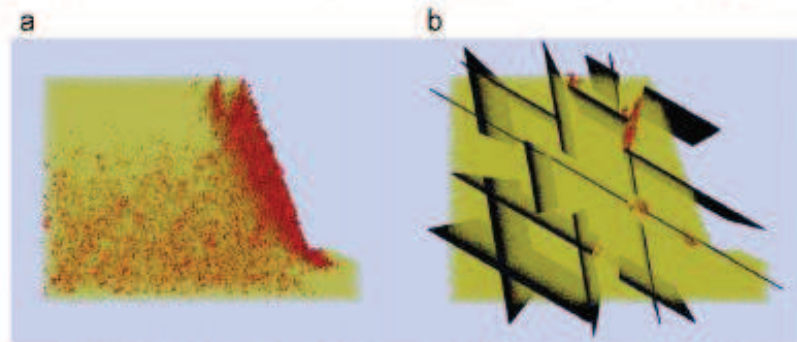


Fig. 16. Crack distributions obtained at failure: (a) intact homogeneous slope, (b) jointed slope.

24

# Méthode des éléments discrets

## Discontinuités non persistantes (Scholtes et Donze, 2012)

La méthode de réduction de la résistance a été utilisée pour simuler la rupture (réduction de la cohésion et de la résistance en traction de la roche intacte)

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| Hauteur                       | A20 m                  |
| Pente                         | 70°                    |
| Pendage <b>des joints</b>     | 30° et 80°             |
| Angle de frottement           | 25°                    |
| Cohésion                      | 0                      |
| Angle de dilatance            | 5°                     |
| Masse volumique               | 2500 kg/m <sup>3</sup> |
| Angle de frottement           | 41,3°                  |
| <b>Cohésion initiale</b>      | <b>divisée par F</b>   |
| <b>Résistance en traction</b> | <b>divisée par F</b>   |
| E                             | 50 GPa                 |
| $\nu$                         | 0,25                   |

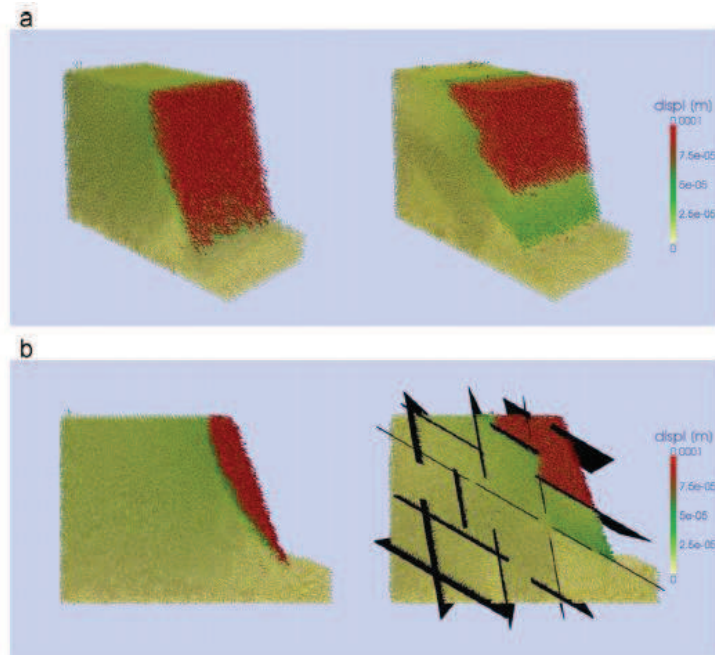


Fig. 17. Displacement fields at failure for an intact homogeneous slope (left) and a jointed slope (right): (a) 3D view, (b) side view.