

## CHAPITRE 03

# PRESENTATION DE L'OUTIL DE SIMULATION ET MODELES DE COMPORTEMENT

### 3-1 Introduction :

L'estimation de l'influence des modes de mouvement d'un écran de soutènement sur les pressions de terre est un problème complexe qui met en jeu des phénomènes de diversité des angles de dilatances du sol  $\psi$ , angles de frottements de l'interface  $\delta$  et des angles de frottements du sol  $\phi$  d'une part et d'une autre part l'estimation de l'influence de la flexibilité d'écran de soutènement sur les pressions de terre. Il met aussi en jeu des phénomènes de diversité des caractéristiques de l'écran lui-même.

Ces conditions complexes justifient l'utilisation d'un outil numérique adapté pour prendre en compte le comportement global de ce type d'étude. La diversité de la nature des matériaux et de leur comportement induit nécessairement la modularité du code de calcul utilisé. De plus, les matériaux présentent généralement un comportement fortement non linéaire et des déformations irréversibles. Le code de calcul FLAC a ainsi été utilisé tant pour les simulations bidimensionnelles que tridimensionnelles,

On va présenter dans ce chapitre les modèles de comportement et l'outil de calcul

### 3-2 Présentation de l'outil de simulation numérique FLAC 2D :

Le logiciel de modélisation en deux ou trois dimensions FLAC 2D est l'un des logiciels les plus utilisés actuellement pour résoudre les problèmes en géotechnique problèmes en contraintes - déformations dans un milieu continu. En tout point du massif, le tenseur des contraintes et des déformations est connu, ce qui permet de visualiser les phénomènes en jeu.

Les matériaux sont représentés par des éléments, ou des zones, qui forment un maillage ajusté par l'utilisateur pour bien correspondre à la forme de l'objet à modéliser. Chaque élément se

comporte selon la loi linéaire ou non linéaire prescrite en réponse aux forces ou aux contraintes appliquées aux bords du modèle. Le matériau peut se plastifier, et le maillage peut se déformer et se déplacer avec le matériau.

FLAC permet de réaliser une modélisation numérique avec différents types de sollicitations.

On distingue:

- Sollicitation mécanique «statique ou dynamique»
- Sollicitation hydraulique sollicitation thermique

Il existe également un couplage entre les différents modes de sollicitation. On réalise avec FLAC des couplages hydromécanique, thermomécanique,.....etc.

FLAC est un code permettant de traiter le milieu continu, mais les éléments «joints» et «interfaces» sont disponibles afin de prendre en compte:

- La modélisation des interfaces ou des joints (failles);
- Le soutènement avec des éléments de structure;
- Le comportement viscoélastique (fluage).

FLAC dispose également d'un langage puissant de programmation dit FICH intégré. Il permet d'écrire nos propres fonctions, de calculer des paramètres particuliers et de mettre en application nos propres modèles constitutifs si désiré.

Le programme est basé sur la méthode des différences finies, les variables sont connues en des lieux discrets de l'espace et il n'est pas nécessaire de stocker une matrice de rigidité globale. Le schéma de résolution est explicite : le calcul dans un élément est effectué sans tenir compte des éléments voisins.

Le logiciel Flac est un code de calcul en différences finies explicites basé sur une formulation numérique appelée « méthode des éléments lagrangiens » (Billiaux et Cundall, 1993).

### **3-2-1 Description du code de calcul :**

#### **3-2-1-1 Méthode des différences finies :**

La méthode des différences finies est une méthode qui permet de résoudre des systèmes d'équations différentielles avec conditions initiales et/ou aux limites. Toute dérivée dans le système d'équations est remplacée par une expression algébrique en terme des variations intervenant dans le système d'équations (contrainte ou déformation), en des lieux discrets de l'espace. Ces variables sont indéterminées ailleurs. Le programme en

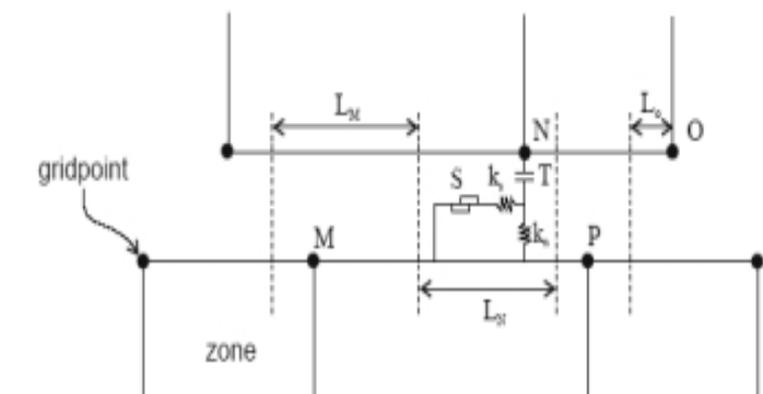
différences finies Flac ne nécessite pas le stockage d'une matrice de rigidité globale de grande taille : les équations sont reformulées à chaque pas.

### 3-2-1-2 Analyse Lagrangienne :

Dans la méthode proposée, les coordonnées des nœuds peuvent être facilement réactualisés à chaque pas de temps, et le maillage se déforme avec le matériau qu'il représente. La formulation est donc « Lagrangienne », par opposition à la formulation « Eulérienne », pour laquelle le maillage reste fixe. L'intérêt de la méthode Lagrangienne est qu'elle permet de traiter facilement des problèmes en grandes déformations.

### 3-2-2 Eléments d'interface :

Les éléments d'interface sont utilisés pour représenter le comportement des zones de localisation des déformations en cisaillement (surface de glissement) ou en traction (fissures).



- S = patin
- Side / T = contrainte de traction
- $k_n$  = raideur normal
- $k_s$  = raideur tangentielle
- $L_N$  = longueur associée au point N
- détermine la limite pour les segments adjacents (au milieu de deux points adjacents)
- Side f

Figure 3-1- Eléments d'interface

Les caractéristiques des interfaces sont :

- La raideur normale  $k_n$  (contrainte/déplacement)
- La raideur tangentielle  $k_s$  (contrainte/déplacement)
- La cohésion  $c$  (contrainte)
- L'angle de dilatance  $\psi$ ,
- L'angle de frottement  $\varphi$ ,
- La résistance à la traction  $T$  (force)

Le critère de Coulomb est adopté. La force de cisaillement sur un élément de longueur  $L$  est limitée par la relation :

$$F_{s\max} = c \cdot L + \tan \varphi \cdot F_n$$

$F_n$  : Est la force normale. Si le critère est atteint,

$F_s$  :  $F_{s\max}$  avec conservation du signe.

Pour les caractéristiques de frottement, de cohésion, de dilatance et de traction limite, on prend généralement celles du matériau le moins résistant. Les raideurs  $k_n$  et  $k_s$  sont plus difficiles à estimer.

### 3-2-3 Eléments structurels :

L'écran peut être modélisé par des éléments massifs ou des éléments poutres. Le premier respecte bien la géométrie de l'ouvrage et offre uniquement les déplacements aux nœuds et les contraintes au centre de l'élément. Les sollicitations de la structure ne sont pas explicites. Elles peuvent être déterminées par la programmation des relations contraintes–sollicitations. Alors que l'élément poutre viole la géométrie de la structure mais fournit les sollicitations de manière explicite.

#### 3-2-3-1 Eléments poutre :

Les éléments poutre sont des éléments bidimensionnels avec trois degrés de liberté à chaque extrémité (translation en  $x$ , en  $y$  et rotation). Une représentation est donnée sur la figure 3-2. Ces éléments peuvent être joints entre eux et/ou aux nœuds du maillage. Les éléments sont caractérisés par leur géométrie et leurs propriétés matérielles.

Les éléments poutre sont considérés comme ayant une section symétrique de surface A, une longueur et un moment d'inertie.

En général, le comportement des éléments poutre est élastique linéaire sans critère de rupture. On attribue ainsi à chaque élément un module d'élasticité E. Les éléments poutre sont généralement utilisés pour représenter des éléments de structure pour lesquels la résistance à la flexion est importante.

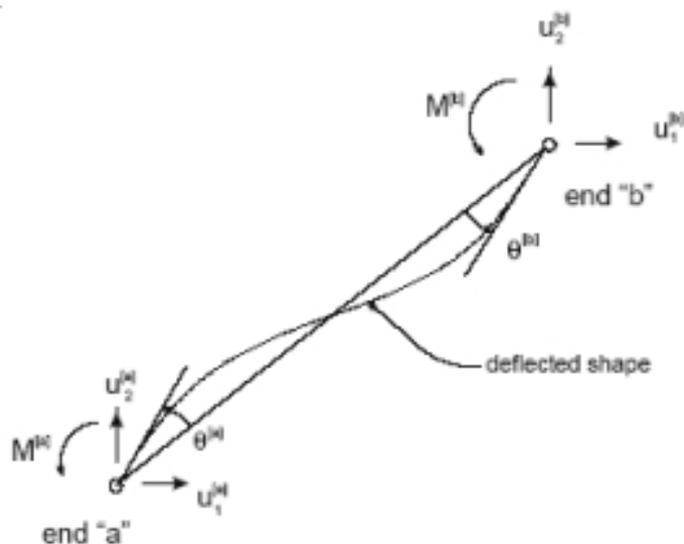


Figure 3-2 – Nomenclature pour un élément poutre

### 3-3 Les modèles de comportements mécaniques dans le logiciel FLAC 2D :

Un certain nombre de modèles de comportement (Équation  $\sigma_n = f(sp, e, k)$ ) sont disponibles dans le logiciel, que l'on peut classer en trois groupes : le modèle nul, les modèles élastiques et les modèles plastiques :

- Le modèle nul : il est utilisé pour représenter des zones de sol excavées,
- Les modèles élastiques : le modèle élastique linéaire et isotrope et le modèle élastique transversalement isotrope,
- Les modèles plastiques avec entre autres :

- 1) Le modèle élastique parfaitement plastique de Mohr-Coulomb,
- 2) Le modèle élasto-plastique avec écrouissage de Cam Clay.

Il est possible d'introduire de nouvelles lois de comportement mécaniques dans le logiciel Flac. Cela est possible avec Flac2D par l'intermédiaire du langage de programmation interne au logiciel (langage FISH). En 3D, le modèle doit être implémenté implémenté en

langage C++, puis compilé en un fichier DLL (Dynamic Link Library). Cette méthode est également utilisable pour FLAC2D.

### 3-3-1 Modèles du comportement élasto-plastique (comportement du sol) :

La plasticité des matériaux est caractérisée par l'apparition des déformations élastiques et des déformations irréversibles, qui se manifestent lorsque la contrainte atteint un certain seuil. L'essai classique de traction sur une éprouvette d'un matériau, ayant un comportement élasto-plastique avec écrouissage figure 3.3, permet de mettre en évidence la non-linéarité et le phénomène d'irréversibilité caractérisant le comportement plastique. L'effet du temps est supposé négligeable.

Le comportement du matériau jusqu'au point A est élastique linéaire. En déchargeant, on revient au point de départ O, toutes les déformations sont réversibles. En continuant le chargement jusqu'au point B et en déchargeant des déformations irréversibles apparaissent.

Dans ce cas la déformation totale est la somme des déformations élastique  $\varepsilon^e$  et plastique  $\varepsilon^p$

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

Le point A est appelé le seuil de plasticité initial.

Lors d'une recharge CB, la plastification réapparaît à partir du point de décharge B, qui définit le seuil de plasticité actuel.

- Si le seuil actuel  $\sigma_B$  est constant, le matériau est dit parfaitement plastique.
- Si  $\sigma_B$  est toujours croissant ou décroissant, le matériau est dit écrouissable à écrouissage positif ou négatif respectivement.

L'une des caractéristiques des géomatériaux (sols, roches, bétons) peut être proche de l'origine O, la détermination expérimentale des seuils de plasticité et du comportement élastique devient délicate.

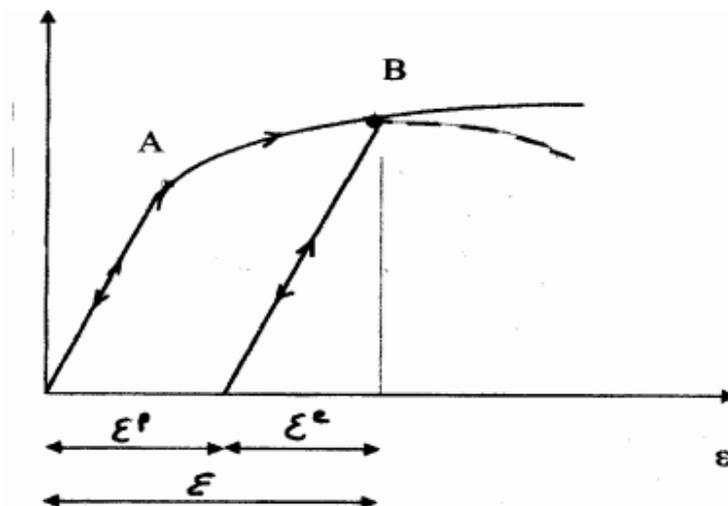


Figure 3-3- Comportement élasto-plastique avec écrouissage.

### 3-3-1-1 Notions de bases fondamentales :

Les modèles de comportement élasto-plastiques sont basés sur trois notions fondamentales :

- la surface de charge,
- la règle d'écrouissage
- la règle d'écoulement.

Nous allons maintenant exposer les bases pour chacune de ces notions.

#### 3-3-1-1-1 La surface de charge :

Au cours de la sollicitation, le sol subit des déformations plastiques (ou permanentes). Les observations expérimentales montrent cependant qu'il existe un domaine dans l'espace des contraintes à l'intérieur duquel le comportement des sols est élastique. Pour une sollicitation quelconque, ce domaine d'élasticité est délimité dans l'espace des contraintes par une surface  $f(\sigma_{ij})$  appelée surface de charge. La condition  $f(\sigma_{ij}) = 0$  est appelée critère de plasticité.

Lorsqu'elle est vérifiée, le point représentatif de l'état de contrainte est situé sur la surface de charge et le comportement du matériau dépend de la direction de l'incrément de contrainte.

La fonction de charge est donc une fonction scalaire du tenseur des contraintes telle que

- Lorsque  $f(\sigma_{ij}) < 0$ , on est à l'intérieur du domaine élastique, les déformations sont réversibles,
- Lorsque  $f(\sigma_{ij}) = 0$ , on est à la frontière du domaine, et des déformations

plastiques peuvent alors avoir lieu, à condition que

$$: \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} > 0 ,$$

On est alors dans le cas du chargement,

- $f(\sigma_{ij}) > 0$  est impossible à atteindre.

La figure 3-4 illustre la notion de surface de charge, de chargement et de déchargement dans le plan déviatorique.

La surface de charge peut dépendre de l'état de contrainte seul, on parlera alors de plasticité parfaite, ou alors dépendre également de l'état de déformation, et on parlera d'écroutissage.

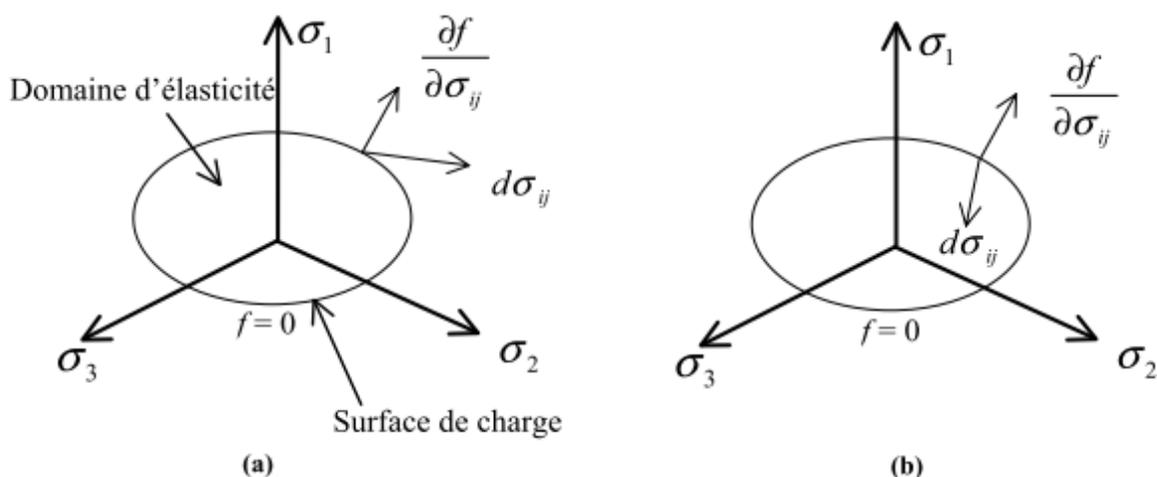


Figure 3-4 – Surface de charge. Cas de charge (a) et de décharge (b)

### 3-3-1-1-2 La règle d'écroutissage :

Un écroutissage correspond à une modification du seuil d'élasticité au cours de la sollicitation. Le domaine d'élasticité d'un matériau dépend de son état d'écroutissage. La loi d'écroutissage précise la modification de la surface de charge au cours de la déformation plastique. On distingue différents types d'écroutissage.

- Pour un écroutissage isotrope, la surface de charge subit une expansion ou une contraction au cours du processus de déformation.
- Pour un écroutissage cinématique, la surface de charge se déplace dans l'espace des contraintes.
- Pour un écroutissage anisotrope, la surface de charge peut subir, en plus d'une

expansion/contraction et d'une translation, une rotation et une déformation. La figure 3-5 illustre l'évolution de la surface de charge dans le cas de l'écrouissage isotrope (a) et de l'écrouissage cinématique (b). Lorsque l'on veut prendre en compte une plasticité apparaissant au cours d'une décharge, ou lorsque l'on veut traduire la réalité expérimentale d'un essai cyclique (phénomène de rochet), l'écrouissage cinématique s'avère nécessaire.

Dans la formulation d'un modèle de comportement, l'écrouissage est pris en compte par le biais d'un paramètre d'écrouissage introduit dans l'expression de la surface de charge. L'écrouissage isotrope nécessite un paramètre d'écrouissage scalaire alors que l'écrouissage cinématique nécessite un paramètre d'écrouissage de nature tensorielle.

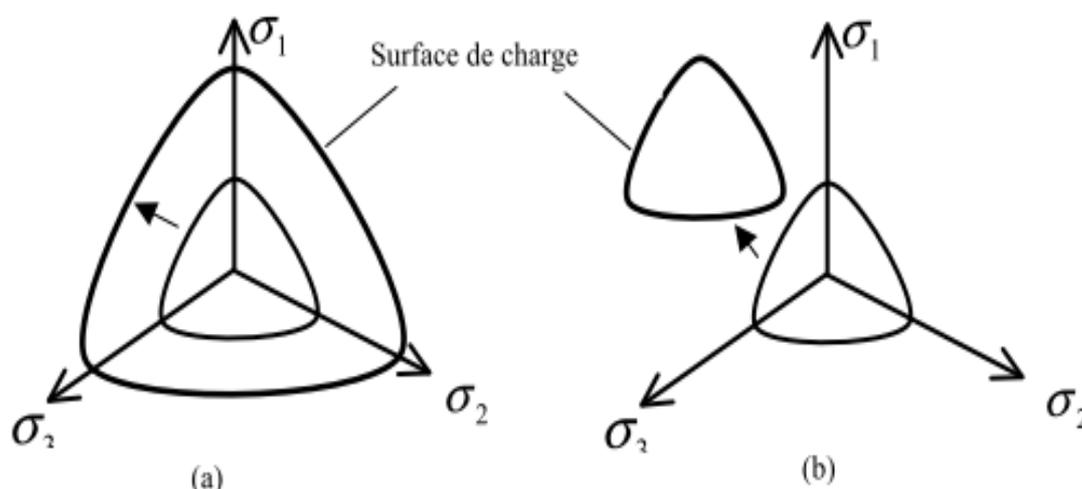


Figure 3-5 – Ecrouissage isotrope (a) et cinématique (b)

### 3-3-1-1-3 La règle d'écoulement :

L'incrément de déformation plastique est caractérisé par sa direction et son amplitude, la direction de l'incrément de déformation plastique est perpendiculaire à la surface définissant le potentiel plastique  $G(s_{ij}) = 0$ . La forme générale de l'incrément de déformation plastique est donnée par l'équation  $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$ . La loi d'écoulement est dite soit associée, soit non associée.

### 3-3-1-1-3-1 Lois d'écoulement associées :

La loi d'écoulement est dite associée à la surface de charge quand cette dernière est confondue avec la surface représentative du potentiel plastique, ce qui revient naturellement à considérer  $F = G$ .

La direction du vecteur déformation plastique dans l'espace des déformations principales (confondu avec celui des contraintes principale) est ainsi perpendiculaire à la surface de charge,  $F = 0$ , c'est-à-dire au vecteur gradient, normal à cette surface. Cela conduit à une loi d'écoulement de la forme.

$$\mathbf{e}_{ij}^p = I \frac{\partial F}{\partial \mathbf{s}_{ij}}$$

Où  $I$  : Est le multiplicateur plastique (scalaire positif)

Pour un état de contrainte  $\mathbf{s}$  tel que  $F = 0$ , deux cas sont possibles :

a) 1<sup>er</sup> cas :

$$F(\mathbf{s}, R) = 0$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{s}, R)}{\partial \mathbf{s}} d\mathbf{s} < 0$$

$$d\mathbf{e} = d\mathbf{e}^e \text{ et donc } d\mathbf{e}^p = 0$$

C'est un cas de décharge et l'incrément de contrainte est dirigé vers l'intérieur du domaine élastique actuel.

b) 2<sup>ème</sup> cas :

$$F(\mathbf{s}, R) = 0$$

$$\frac{\partial F(\mathbf{s}, R)}{\partial \mathbf{s}} d\mathbf{s} > 0$$

$$d\mathbf{e} = d\mathbf{e}^e + d\mathbf{e}^p$$

C'est un cas de chargement et l'incrément de contrainte est dirigé vers l'extérieur du domaine élastique actuel.

Les matériaux pour lesquels la loi d'écoulement est dite associée, sont dits standards. C'est le cas des métaux ou des sols purement cohérents.

### 3-3-1-1-3-2 Lois d'écoulement non associées :

Dans le cas des sols flottants, les lois d'écoulement sont non associées. Dans ce cas, la direction du vecteur déformation plastique est perpendiculaire à la surface représentative du potentiel plastique,  $G(s_{ij})=0$  qui est distincte de celle représentative de la fonction de charge plastique  $F(s_{ij})=0$ .

### 3-3-2 Le modèle élastique parfaitement plastique de Mohr-Coulomb :

Le critère de Mohr-Coulomb est utilisé pour les sols pulvérulents (sables) et pour les sols cohérents à long terme (argiles et limons). Le critère de Tresca est un cas particulier du critère de Mohr-Coulomb.

La surface de charge  $f(\sigma_{ij})$  s'exprime de la façon suivante :

$$f(\sigma_{ij}) = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - 2c \cos \varphi = 0$$

Où  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  représentent les contraintes principales extrêmes ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ).

Le paramètre  $c$  est la cohésion du matériau et  $\varphi$  l'angle de frottement interne.

Lorsque  $\varphi = 0$ , on retrouve le critère de Tresca.

La figure 3-6 donne des représentations du critère de Mohr-Coulomb dans le plan déviatorique et dans celui des contraintes principales.

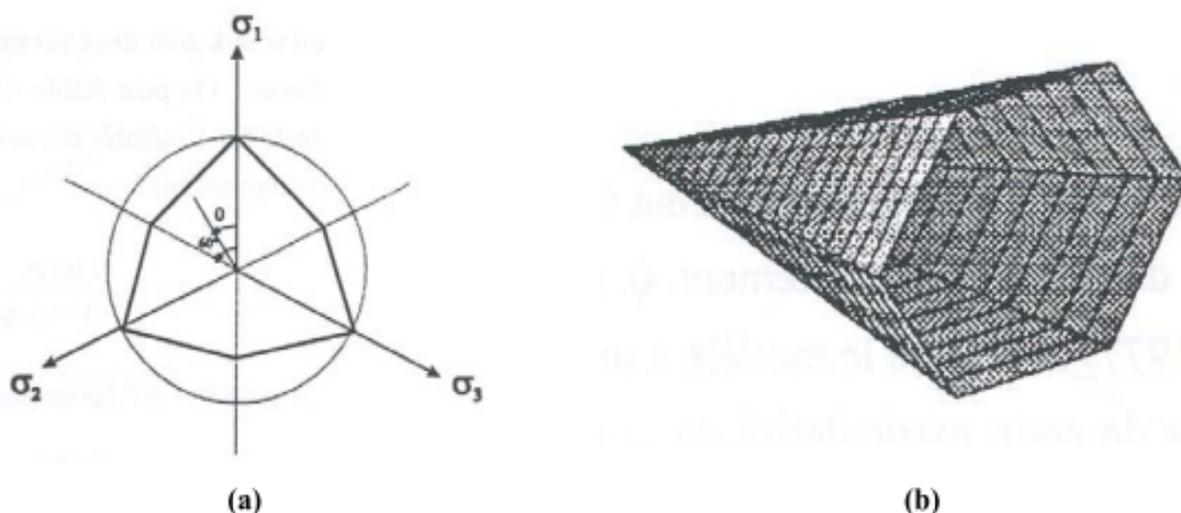
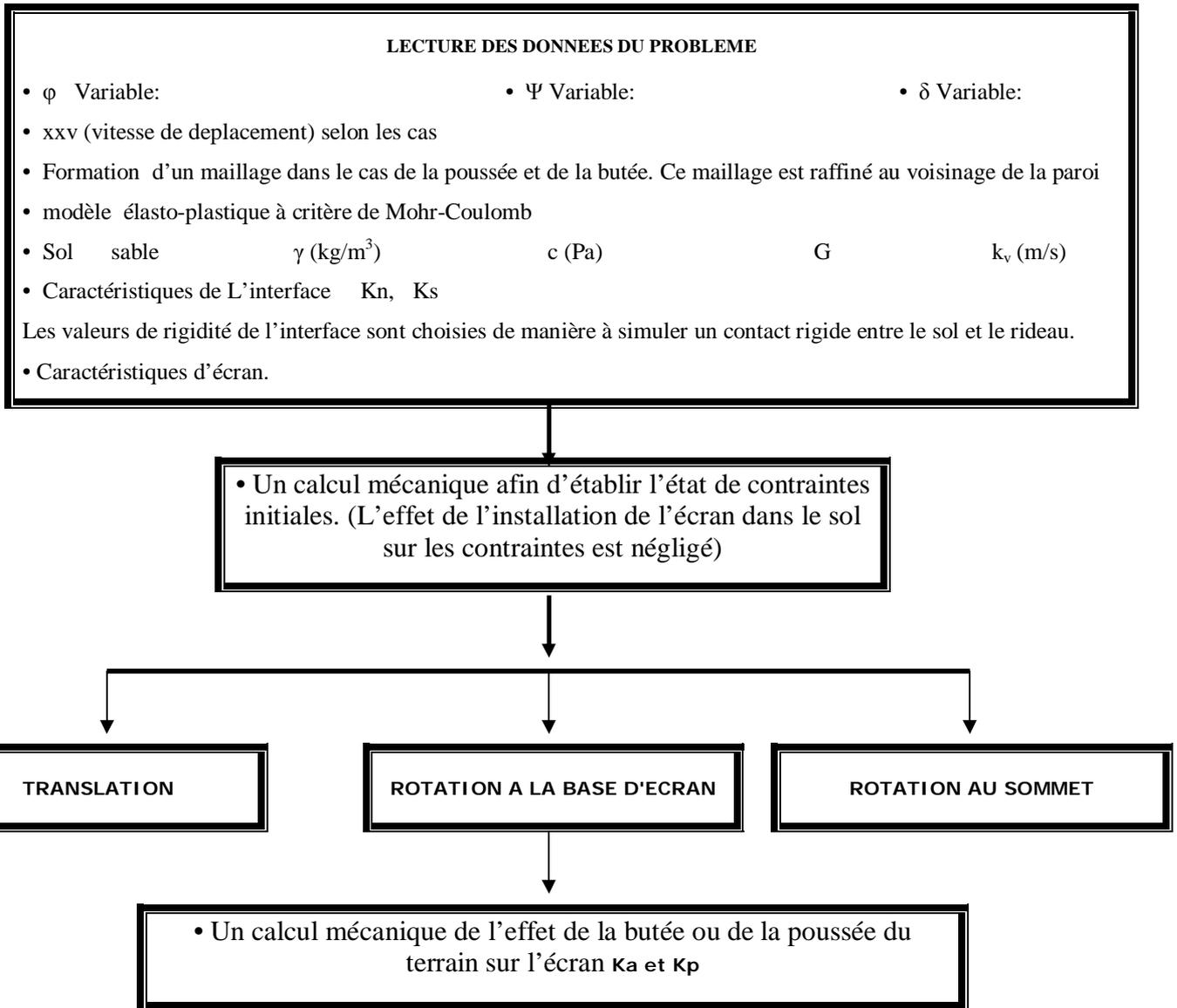


Figure 3-6 – Représentations du critère de Mohr-Coulomb : (a) – dans le plan déviatorique, (b) – dans l'espace des contraintes principales (Lee, 1994)

### 3-4 Programme de calcul adopté :

#### 3-4-1 Ecran de soutènement rigide :



### 3-4-2 Ecran de soutènement flexible :

