

# Chapitre IV : Présentation du logiciel Plaxis et Applications

## 1. Introduction

PLAXIS est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows. Pour se familiariser rapidement avec l'utilisation de cette interface et avec les caractéristiques principales du programme, l'utilisateur est invité à s'exercer grâce aux exemples de calculs décrits dans le *Tutorial Manual*.

Le présent manuel de référence est destiné aux utilisateurs qui désirent obtenir plus d'informations sur les caractéristiques du programme. Il traite de sujets qui ne sont pas traités en intégralité dans le *Tutorial Manual*. Il contient également des détails pratiques quant à l'utilisation de PLAXIS pour un large éventail de problèmes.

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (*Input*, *Calculations*, *Output* et *Curves*). Le présent manuel de référence est organisé en quatre parties correspondant à ces quatre sous-programmes, et suit la liste des options spécifiques qui apparaissent dans les menus correspondants. Ce manuel ne contient pas d'information détaillée sur les modèles rhéologiques, la formulation des éléments finis ou les algorithmes non linéaires employés dans le programme. Pour plus d'informations sur ces points et sur d'autres sujets connexes, l'utilisateur pourra se reporter aux diverses références du chapitre 7, au *Scientific Manual* et au *Material Models Manual*.

## 2. Programme d'entrée des données (INPUT)



Cette icône représente le programme d'entrée des données (*Input*). Ce programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales. La génération des conditions initiales est faite dans un menu spécifique du programme Input (mode conditions initiales). La description se concentre tout d'abord sur la création d'un modèle géométrique et d'un maillage d'éléments finis (mode de création géométrique).

Au début du programme Input, une boîte de dialogue apparaît ; on peut y choisir d'ouvrir un projet existant ou d'en créer un nouveau. Si "nouveau projet" (*New project*) est sélectionné, la fenêtre des réglages généraux (*General settings*) apparaît ; tous les paramètres de base du nouveau projet peuvent être saisis (Paragraphe 3.2.2 Réglages généraux).

Si l'utilisateur choisit d'ouvrir un projet existant (*Existing project*) la boîte de dialogue permet une sélection rapide de l'un des quatre projets les plus récents. Si le projet voulu n'apparaît pas dans la liste, l'option <<<More files>>> peut être utilisée. Le gestionnaire de fichiers apparaît alors, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir un aperçu de tous les répertoires accessibles et de sélectionner le fichier de projet PLAXIS souhaité (\*.plx). Après le choix d'un projet existant, le modèle géométrique correspondant est présenté dans la fenêtre principale.

### 3. Le type de modèle (Model : Fig. 3.3)

PLAXIS Version 8 peut être utilisé pour réaliser des analyses par éléments finis en deux dimensions. Les modèles d'éléments finis peuvent être soit plans (*Plane strain*), soit axisymétriques (*Axisymmetric*). Des programmes de PLAXIS séparés sont disponibles pour effectuer des analyses 3D. Le réglage par défaut du paramètre *Model* est *Plane strain*.

Les modèles en déformations planes (*Plane strain*) sont utilisés pour des structures ayant une section (plus ou moins) uniforme, et avec un état de contraintes et un schéma de chargement uniformes sur une longueur suffisante perpendiculairement à la section (direction  $z$ ). Les déplacements perpendiculaires à la section sont considérés comme nuls. Cependant, les contraintes normales dans la direction  $z$  sont intégralement prises en compte.

Les modèles axisymétriques (*Axisymmetric*) sont utilisés pour des structures circulaires ayant une section radiale (plus ou moins) uniforme, avec un schéma de chargement réparti autour de l'axe central et des états de contrainte et de déformation identiques selon les directions radiales. A noter que pour les problèmes axisymétriques, la coordonnée  $x$  représente le rayon et la coordonnée  $y$  correspond à l'axe de symétrie. Il ne faut pas utiliser dans ce cas de coordonnées  $x$  négatives.

Pour un modèle d'éléments finis à deux dimensions, le choix de *Plane strain* ou de *Axisymmetry* a pour conséquence de ne laisser que deux degrés de liberté en translation par nœud dans les directions  $x$  et  $y$ .

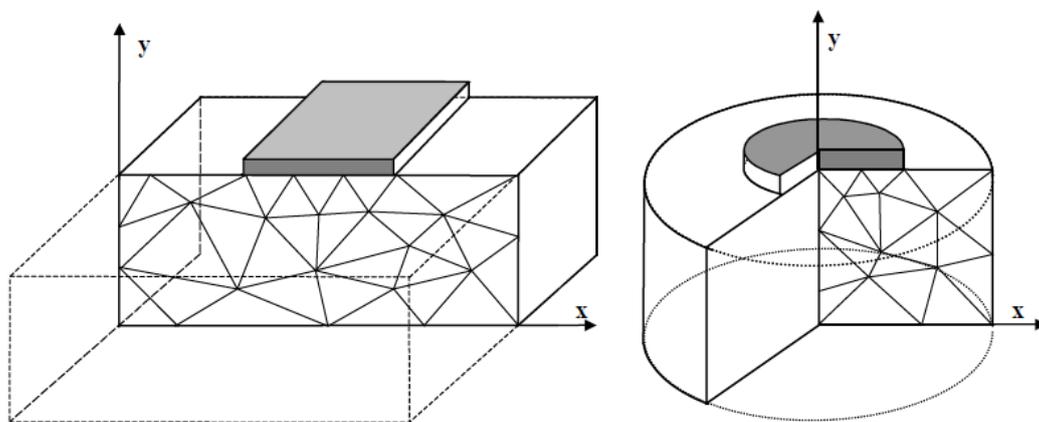


Figure 3.3 Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique

### 4. Les éléments (Fig. 3.4)

L'utilisateur doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds (Figure 3.2) pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. L'élément par défaut est le triangle à 15 nœuds. Il fournit une interpolation du quatrième ordre pour les déplacements et l'intégration numérique se fait sur douze points de Gauss (points de contrainte). Pour le triangle à 6 nœuds,

l'interpolation est d'ordre deux et l'intégration numérique se fait sur trois points de Gauss. Le type d'éléments pour les éléments de structure est automatiquement compatible avec le type d'éléments de sol choisi.

Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui a produit des résultats en contraintes de haute qualité sur différents problèmes, comme par exemple le calcul de la rupture de sols incompressibles. (Références 8, 12, 13). L'utilisation des triangles à 15 nœuds implique une consommation de mémoire assez élevée, et les calculs et la manipulation sont donc un peu ralentis. C'est pour cela qu'un type d'éléments plus simple est également disponible.

Le triangle à 6 nœuds est un élément relativement précis donnant de bons résultats pour les analyses standards en déformations, à condition d'utiliser un nombre suffisant d'éléments. Cependant, il faut être prudent dans le cas de modèles axisymétriques ou dans des situations où une rupture (possible) est à prendre en compte, comme un calcul de capacité portante ou le calcul de coefficient de sécurité selon la méthode de *phi-c reduction*. Les charges à la rupture et les coefficients de sécurité sont généralement surévalués avec des éléments à 6 nœuds. Pour ces calculs, il convient d'utiliser plutôt des éléments à 15 nœuds.

Un élément à 15 nœuds peut être imaginé comme la réunion de quatre éléments à 6 nœuds, étant donné que le nombre de nœuds et de points de contraintes est identique dans les deux cas. Néanmoins, un élément à 15 nœuds est plus puissant que quatre éléments à 6 nœuds réunis.

Activate \

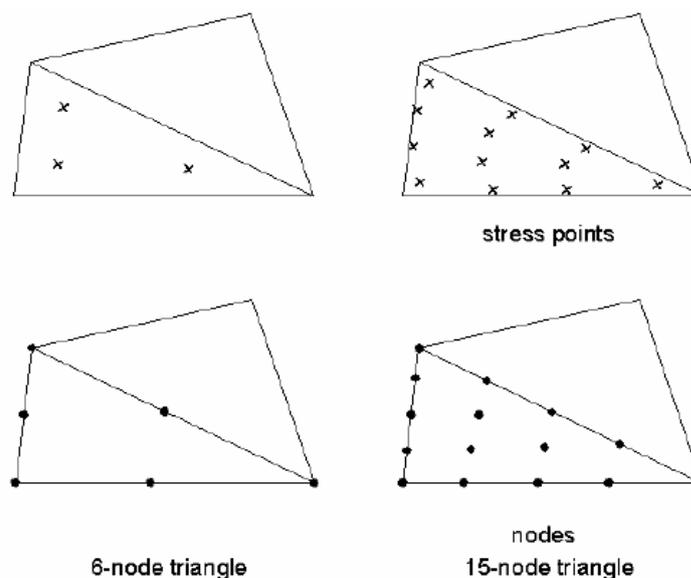


Figure 3.4 Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol

## 5. La géométrie

La génération du modèle d'éléments finis commence par la création du modèle géométrique, qui est la représentation du problème réel à étudier. Un modèle géométrique consiste en des points, des lignes et des couches. Les points et les lignes sont définis par l'utilisateur, alors que les couches sont générées par le programme. En plus de ces composants de base, des éléments de structure et des conditions spéciales peuvent être ajoutés au modèle géométrique pour simuler le soutènement des tunnels, les écrans, les plaques, l'interaction sol-structure ou les chargements.

Il est recommandé de commencer la création du modèle géométrique par le dessin du contour. L'utilisateur peut, de plus, spécifier les limites de couches, les éléments de structure, les lignes séparant les étapes de construction, les charges et les conditions aux limites. Le modèle géométrique doit non seulement comporter la situation initiale, mais aussi les éventuelles étapes de construction à considérer dans les phases ultérieures.

Après la définition de la géométrie, l'utilisateur devra saisir les paramètres relatifs aux matériaux puis, assigner ces jeux de données aux éléments géométriques (paragraphe 3.5). Lorsque le modèle géométrique est entièrement défini, et lorsque les propriétés de tous les éléments géométriques ont été affectées, le modèle géométrique est terminé et le maillage peut être généré (paragraphe 3.6).

## 5.1 Sélections des éléments géométriques



Lorsque l'outil de sélection (la flèche rouge) est active, un élément géométrique peut être sélectionné en cliquant sur cet élément à la souris dans le modèle géométrique. Plusieurs éléments de même type peuvent être sélectionnés simultanément en gardant appuyé le bouton *Shift* du clavier pendant la sélection.

## 5.2 Propriétés des éléments géométriques

La plupart des composants géométriques ont certaines propriétés qui peuvent être visualisées et modifiées depuis la fenêtre des propriétés des matériaux. Après avoir double-cliqué un élément géométrique, la fenêtre des propriétés correspondantes apparaît. Si plusieurs objets sont situés sous le point indiqué, une boîte de dialogue apparaît permettant de choisir l'élément dont on veut afficher les propriétés.

## 6. Les points et les lignes



L'élément de base pour créer un modèle géométrique est la ligne (*Geometry line*). Cet élément peut être sélectionné à partir du menu *Geometry* ou à partir de la seconde barre d'outils.

Lorsque l'option *Geometry line* est sélectionnée, l'utilisateur peut créer des points et des lignes sur la planche à dessin en cliquant avec le pointeur de la souris (entrée graphique) ou en tapant les coordonnées au niveau de la ligne de commande (entrée au clavier). Dès que le bouton gauche de la souris est cliqué sur la planche à dessin, un nouveau point est créé, pourvu qu'il n'y ait pas déjà de point trop près du pointeur de la souris, auquel cas, le pointeur sélectionne le point existant sans en créer un nouveau. Après la création du premier point, l'utilisateur peut dessiner une ligne en entrant un nouveau point, etc... La génération de points et de lignes continue jusqu'à ce que l'utilisateur clique sur le bouton droit de la souris ou appuie sur le bouton *Esc*.

Après chaque action de dessin, le programme détermine les couches qui peuvent être identifiées. Une couche est une zone fermée entourée de différentes lignes géométriques. En d'autres termes, une couche est une surface fermée par des lignes. Les couches détectées sont légèrement ombrées. Chaque couche peut et doit recevoir des propriétés de matériau pour simuler le comportement du sol dans cette partie de la géométrie (paragraphe 3.5.2). Les couches sont divisées en éléments de sol pendant la génération du maillage (paragraphe 3.6).

## 7. Les plaques



Les plaques sont des éléments de structure utilisés pour modéliser des structures élancées placées dans le sol et ayant une rigidité de flexion et une raideur normale significatives. Les plaques peuvent être utilisées pour modéliser l'influence de murs, plaques, coques ou soutènements s'étendant selon  $z$ . Dans un modèle géométrique, les plaques sont des 'lignes bleues'. La Figure 3.6 montre des exemples d'utilisation des éléments de plaque.

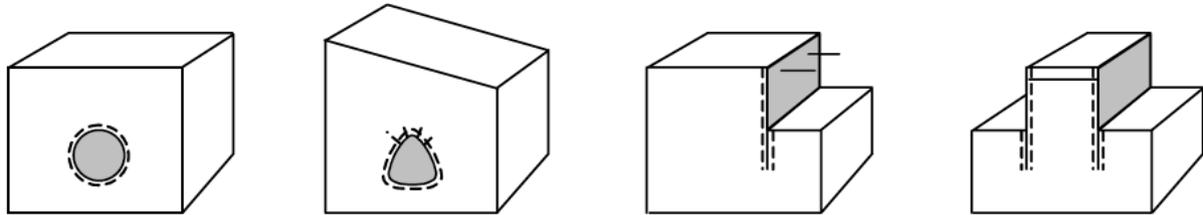


Figure 3.6 Applications pour lesquelles des plaques, des ancrages ou des interfaces sont utilisés.

L'outil "plaques" peut être sélectionné à partir du menu *Geometry* ou en cliquant sur le bouton correspondant dans la barre d'outils. La création de plaques dans un modèle géométrique est similaire à celle de lignes géométriques (paragraphe 3.3.1). Lorsque des plaques sont créées, les lignes géométriques correspondantes sont créées simultanément. Il n'est donc pas nécessaire de créer d'abord une ligne géométrique à la future position d'une plaque. Les plaques peuvent être effacées en les sélectionnant dans la géométrie et en appuyant sur la touche *Suppr* du clavier.

Les caractéristiques des plaques sont regroupées dans la base de données des matériaux (paragraphe 3.5.3). Les paramètres les plus importants sont la rigidité de flexion  $EI$  et la raideur axiale  $EA$ .

A partir de ces deux paramètres, l'épaisseur équivalente de la plaque est calculée à partir de l'équation :

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}}$$

Les plaques peuvent être activées ou désactivées lors des phases de calcul en utilisant la construction par étapes (*Staged construction*).

## 8. Rotules et raideurs en rotation



Une articulation est une liaison entre éléments de plaque autorisant la rotation au point de jonction. Par défaut, en un point de raccord entre des éléments de plaque, la rotation est continue et le point ne possède qu'un seul degré de liberté en rotation. En d'autres termes, la liaison entre éléments de plaque est rigide par défaut (encastrement). Si l'utilisateur souhaite créer une rotule (les extrémités de plaque peuvent tourner librement l'une par rapport à l'autre), ou une raideur en rotation (un joint où la rotation des extrémités des plaques l'une par rapport à l'autre nécessite un couple fini), l'option rotule et raideur en rotation (*Hinges and rotation springs*) peut être sélectionnée à partir du menu *Geometry* ou en cliquant sur le bouton correspondant dans la barre d'outils.

Lorsque cette option est sélectionnée et que l'utilisateur a cliqué sur un point de la

géométrie où au moins deux plaques se rejoignent, la fenêtre *Hinges and rotation springs* apparaît, et présente une vue détaillée du point de jonction de toutes les plaques aboutissant à ce point. Pour chaque extrémité de plaque, il est possible d'indiquer si la liaison est une rotule ou un encastrement : une rotule est indiquée par un cercle vide alors qu'un encastrement est représenté par un cercle plein.

Après avoir sélectionné une connexion de plaque particulière en cliquant sur le cercle correspondant, la connexion peut être basculée d'un encastrement vers une rotule et vice-versa en cliquant de nouveau sur le cercle. Pour chaque articulation, un degré de liberté supplémentaire en rotation est introduit pour permettre une rotation indépendante.

En réalité, les connexions de plaques peuvent permettre des rotations, mais ceci requiert généralement un couple. Pour modéliser une telle situation, PLAXIS permet l'ajout d'une raideur en rotation entre deux plaques. Cette option est utile uniquement si au moins l'une des deux connexions individuelles de plaques est une articulation (sinon la connexion entre les deux plaques est rigide). Pour définir le ressort en rotation entre 2 plaques, dans le cas où plus de 2 plaques se rejoignent au même point (plusieurs connexions deux à deux paramétrables), il faut d'abord sélectionner la connexion voulue (en cliquant sur le "grand" arc de cercle correspondant). Il faut ensuite cliquer sur le cercle représentant la liaison (comparable aux articulations), sur l'arc de cercle sélectionné. Dans le cas d'une plaque droite, il n'y a pas à sélectionner d'arc de cercle : on peut directement cliquer sur l'articulation elle-même (petit cercle central). Après avoir sélectionné une raideur en rotation particulière en cliquant sur le cercle correspondant, elle peut être basculée de l'état actif à l'état inactif en cliquant une nouvelle fois sur celui-ci.

Quand une raideur en rotation est créée, ses propriétés doivent être entrées directement dans la partie droite de la fenêtre. Ces propriétés comprennent sa raideur et le couple maximal qu'elle peut supporter. La raideur est définie en moment par radian (selon l'unité Force fois Longueur par radian par Longueur hors-plan).

## 9. Géo-grilles



Les géogrilles sont des éléments élancés possédant une rigidité normale mais aucune rigidité de flexion. Les géotextiles ne peuvent résister qu'à des efforts de traction et non à des efforts de compression. Ces éléments sont principalement utilisés pour modéliser des renforcements de sol. Des exemples de structures géotechniques incluant des géogrilles sont présentés sur la figure 3.9.

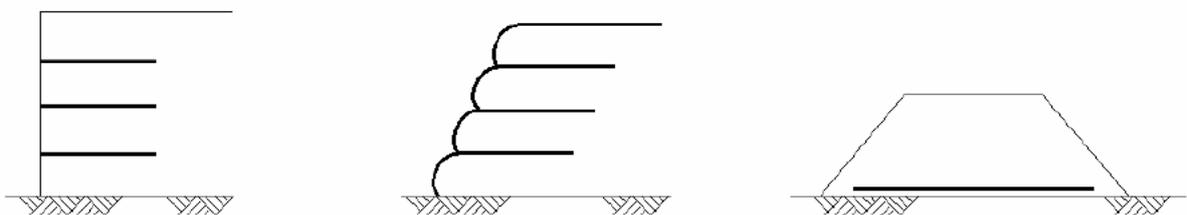


Figure 3.9 Applications incluant des géotextiles.

Les géogrilles peuvent être sélectionnés à partir du menu *Geometry* ou en cliquant sur le bouton correspondant dans la barre d'outils. La création de géotextiles dans le modèle géométrique est semblable à la création de lignes géométriques (voir paragraphe 3.3.1). Elles apparaissent comme des 'lignes jaunes' sur le modèle géométrique. Lors de la

création de géogrilles, les lignes géométriques correspondantes sont créées simultanément. L'unique propriété du matériau géotextile est une rigidité élastique normale  $EA$ , qui est spécifiée dans les données relatives aux matériaux (voir paragraphe 3.5.4). Les géogrilles peuvent être supprimées en les sélectionnant dans la géométrie puis en appuyant sur la touche *Suppr* sur le clavier.

## 10. Les interfaces



Une "épaisseur virtuelle" est assignée à chaque interface. C'est une dimension fictive utilisée pour définir les caractéristiques du matériau affectées à l'interface. Plus l'épaisseur virtuelle est importante et plus les déformations élastiques générées sont importantes. En général, les éléments d'interface sont supposés ne générer que de très petites déformations élastiques et donc l'épaisseur virtuelle devra être faible. D'autre part, si elle est trop faible, des erreurs numériques peuvent apparaître. L'épaisseur virtuelle est déterminée par le facteur d'épaisseur virtuelle (*Virtual thickness factor*) multiplié par la taille moyenne des éléments. Cette dernière est déterminée à partir de la densité globale d'éléments utilisée pour la génération du maillage (paragraphe 3.6.2). Cette valeur est également fournie par la fenêtre d'information générale (*General information window*) du programme Output. La valeur par défaut du facteur d'épaisseur virtuelle est 0,1. Elle peut être modifiée en double-cliquant sur la ligne géométrique et en sélectionnant l'interface dans la boîte de dialogue. En général, cette valeur ne doit être modifiée qu'avec circonspection. Cependant, si des éléments d'interface sont sujets à des contraintes très importantes, il peut être nécessaire de réduire l'épaisseur virtuelle comme indiqué dans le paragraphe 3.5.2.

La création d'une interface est similaire à celle d'une ligne géométrique. L'interface apparaît sous la forme d'un trait pointillé sur la droite de la ligne géométrique (en fonction de la direction du dessin) pour indiquer de quel côté de la ligne géométrique auront lieu les interactions avec le sol. Le côté où l'interface apparaîtra est aussi indiqué par la flèche du pointeur orientée dans la direction du dessin. Pour placer une interface de l'autre côté, il faut la dessiner dans la direction opposée. Notez que des interfaces peuvent être placées des deux côtés d'une ligne géométrique. Cela permet une interaction totale entre les éléments de structure (écrans, plaques, géogrilles, etc...) et le sol avoisinant. Pour distinguer les deux interfaces possibles de part et d'autre d'une ligne géométrique, celles-ci sont identifiées par un signe (+) ou un signe (-). Ce signe ne correspond qu'à cette identification ; il n'a pas de signification physique et n'a aucune influence sur les résultats. Les interfaces peuvent être effacées en les sélectionnant puis en appuyant sur la touche *Suppr* du clavier.

Un exemple d'application des interfaces est la modélisation de l'interaction entre une palplanche et le sol, dans un cas intermédiaire entre parfaitement lisse, et parfaitement rugueux. Dans ce cas, les interfaces sont placées des deux côtés de la palplanche. La rugosité de l'interface est modélisée par le choix d'une valeur convenable du facteur de réduction des efforts à l'interface ( $R_{inter}$ ). Ce facteur relie les caractéristiques de l'interface (frottement de la paroi et adhérence) aux caractéristiques du sol (angle de frottement et cohésion). Au lieu de définir  $R_{inter}$  directement comme une propriété de l'interface, l'utilisateur est amené à spécifier ce paramètre en même temps que les paramètres de résistance du sol. Pour des informations plus détaillées sur les propriétés des interfaces, l'utilisateur est prié de se reporter au paragraphe 3.5.2.

Les interfaces peuvent être activées et désactivées lors des phases de calcul en utilisant une construction par étapes (*Staged construction*).

## 11. Éléments nœud à nœud



Les éléments nœud à nœud sont des éléments élastiques utilisés pour modéliser des liaisons entre deux points. Ce type d'ancrage peut être sélectionné à partir du menu *Geometry* ou en cliquant sur l'icône correspondante située dans la barre d'outils. Une application typique de ce type d'élément est la modélisation de batardeaux, comme indiqué sur la figure 3.6. Il n'est pas recommandé de dessiner une ligne géométrique à la position future d'un élément nœud à nœud. Cependant, les extrémités des éléments doivent toujours être connectées à des lignes géométriques (mais pas nécessairement à des points existants). Un nouveau point est automatiquement créé si nécessaire. La création d'éléments nœud à nœud est semblable à la création de lignes géométriques (paragraphe 3.3.1), mais contrairement au cas des autres éléments de structure, les lignes géométriques sous-jacentes ne sont pas créées simultanément avec les ancrages. Ainsi, les éléments nœud à nœud ne diviseront pas les couches et n'en créeront pas de nouvelles.

Un élément nœud à nœud est un élément élastique à deux nœuds ayant une raideur élastique constante (raideur normale). Ces éléments peuvent être soumis à des efforts de traction (pour les tirants) aussi bien qu'à des efforts de compression (pour les butons). D'autre part, les efforts de traction et de compression peuvent être limités, afin de simuler la rupture de tirants ou de butons. Les propriétés peuvent être saisies dans la base de données des matériaux (paragraphe 3.5.5).

Go to PC set

Un élément nœud à nœud peut être activé, désactivé ou précontraint dans une phase de calcul en utilisant une construction par étapes (*Staged construction*).

## 11. Encrage à tête fixe



Les ancrages à tête fixe sont des éléments élastiques qui servent à modéliser une liaison à partir d'un seul point. Ce type d'ancrage peut être sélectionné à partir du menu *Geometry* ou en cliquant sur l'icône correspondante située dans la barre d'outils. Un exemple d'utilisation d'ancrages à tête fixe est la modélisation de butons (ou d'étais) pour les rideaux de palplanches comme indiqué sur la figure 3.6. Les ancrages à tête fixe doivent toujours être reliés à des lignes géométriques existantes, mais pas nécessairement à des points existants. Un ancrage à tête fixe est représenté par un T tourné ( $-|$ ). La longueur de ce T n'a pas de signification physique particulière. Par défaut, un ancrage à tête fixe pointe dans la direction des  $x$  positifs, c'est-à-dire que l'angle dans le plan  $(x,y)$  est nul. En double cliquant au milieu du T, l'utilisateur fait apparaître la fenêtre des propriétés de l'ancrage, dans laquelle l'angle peut être modifié. L'angle est défini dans le sens trigonométrique à partir de la direction des  $x$  positifs vers la direction des  $y$ . En plus de l'angle, la longueur équivalente de l'ancrage peut être saisie dans la fenêtre des propriétés. La longueur équivalente est définie comme la distance entre le point de liaison de l'ancrage et le point fictif selon la direction longitudinale de l'ancrage où le déplacement est considéré comme nul.

Un ancrage à tête fixe est un élément élastique à un nœud ayant une raideur élastique constante (raideur normale). L'autre extrémité de l'ancrage (définie par sa longueur équivalente et sa direction) est fixe. Les propriétés peuvent être saisies dans la base de données des matériaux (paragraphe 3.5.5).

Les ancrages à tête fixe peuvent être activés, désactivés ou précontraints au cours d'un calcul plastique en utilisant une construction par étapes (*Staged construction*).

## 12. Tunnels



L'option Tunnels permet de créer des sections de tunnel circulaires ou non, à intégrer dans le modèle géométrique. Une section de tunnel est composée d'arcs et de lignes, auxquels on peut ajouter un soutènement et une interface. Une section de tunnel peut être sauvegardée en tant qu'objet sur le disque dur (c'est-à-dire sous forme d'un fichier portant l'extension .TNL) et incluse dans d'autres projets. L'option tunnel est accessible à partir du menu *Geometry* ou de la barre d'outils.

### ***Assistant tunnels***

Dès que l'option tunnel a été sélectionnée, la fenêtre de l'assistant tunnels (*Tunnel designer*) apparaît.

L'assistant tunnels contient les éléments suivants (Figure 3.14) :

*Menu tunnels:* Menu dont les options permettent d'ouvrir et de sauvegarder un tunnel, et de lui donner des caractéristiques.

*Barre d'outils:* Barre contenant les boutons de raccourcis pour définir les caractéristiques d'un tunnel.

*Affichage:* Zone de dessin (affichage) du tunnel.

*Règles:* Les règles indiquent les dimensions du tunnel en coordonnées locales. L'origine du système de coordonnées local est utilisée comme point de référence pour positionner le tunnel dans le modèle géométrique.

*Boîte des sections:* Boîte contenant les paramètres et les caractéristiques de la section de tunnel sélectionnée. Les boutons peuvent être utilisés pour sélectionner d'autres sections

*Autres paramètres:* Voir plus loin.

*Boutons standards:* Permettent d'accepter (OK) ou d'annuler le tunnel créé.

### ***Forme de base du tunnel***

Une fois que l'option tunnel a été sélectionnée, l'utilisateur peut choisir entre trois formes de base pour le tunnel :



Tunnel entier (*Whole tunnel*)



Demi-section gauche du tunnel (*Half a tunnel - Left half*)



Demi-section droite du tunnel (*Half a tunnel - Right half*)

Un tunnel entier doit être utilisé si la section du tunnel est incluse dans le modèle géométrique. Un demi tunnel doit être utilisé si le modèle géométrique ne comprend

qu'une seule moitié d'un problème symétrique dont l'axe de symétrie correspond à celui du tunnel. Selon le côté choisi par rapport à l'axe de symétrie, l'utilisateur devra choisir la moitié droite ou la moitié gauche du tunnel. Un demi tunnel peut également être utilisé pour définir les côtés courbes d'une grande structure, telle qu'un réservoir de stockage souterrain. Les parties linéaires restantes de la structure peuvent être ajoutées sur la planche à dessin en utilisant des lignes géométriques ou des plaques.

### **Type de tunnel :**

Avant de créer la section, il faut sélectionner le type de tunnel. Les options disponibles sont : aucune (*None*), tunnel foré (*Bored tunnel*) ou tunnel NATM (*NATM tunnel*).

*None* : Sélectionnez cette option quand vous voulez créer un contour géométrique interne composé de différentes portions et que vous n'avez pas l'intention de créer un tunnel. Chaque portion est définie par une ligne, un arc ou un "coin". Le contour du tunnel est composé de deux lignes si le paramètre d'épaisseur (*Thickness*) est défini par une valeur positive. Les deux lignes définiront des couches séparées avec une épaisseur correspondante, lorsque le contour sera inséré dans le modèle géométrique. Un soutènement (coque) et une interface peuvent être ajoutés individuellement à chaque portion du contour extérieur du tunnel.

*Bored tunnel* : Sélectionnez cette option pour créer un tunnel circulaire incluant un revêtement homogène (composé d'une coque circulaire ) et une interface à l'extérieur. La forme du tunnel est composée de différentes portions définies par des arcs. Le revêtement du tunnel étant circulaire, le rayon de chaque portion correspond à celui défini pour la première. Le contour du tunnel est composé de deux lignes si l'on définit une valeur positive pour le paramètre d'épaisseur (*Thickness*). Ainsi, il est possible de créer un revêtement épais composé d'éléments volumiques.

Le revêtement du tunnel (coque) est considéré comme étant homogène et continu. De fait, il n'est possible d'assigner des données matérielles et d'activer ou désactiver la coque dans le cadre d'une construction par étapes qu'en considérant la coque dans son ensemble (et non en considérant chaque portion individuellement). Si la coque est active, une contraction du tunnel peut être spécifiée pour simuler la perte de volume due au processus de forage du tunnel (paragraphe 4.7.8).

*NATM tunnel* : Sélectionnez cette option pour créer un tunnel incluant un revêtement (composé de plaques) et une interface extérieure. Le contour du tunnel est constitué de différentes portions pouvant être définies par des arcs. Il est formé de deux lignes si l'on définit une valeur positive pour le paramètre d'épaisseur (*Thickness*). Ainsi, il est possible de créer un revêtement épais composé d'éléments volumiques. Il est possible de définir une coque sur le contour extérieur, par exemple pour simuler la combinaison d'un soutènement extérieur (béton projeté représenté par des plaques) et d'un revêtement intérieur (revêtement final représenté par des éléments volumiques).

Le soutènement du tunnel (coque) est considéré comme étant discontinu. De fait, il est possible d'assigner des caractéristiques, et d'activer ou désactiver la coque dans le cadre d'une construction par étapes en considérant chaque portion individuellement. Il n'est pas possible d'appliquer une contraction de la coque pour les tunnels NATM. Pour simuler les déformations dues à l'excavation et à la construction dans les tunnels NATM, d'autres méthodes de calcul sont disponibles (paragraphe 4.7.6 et 4.7.11).

### 13. Chargements et conditions limites

Le menu chargement (*Loads*) contient les options permettant d'introduire les surcharges, charges linéiques ou charges ponctuelles, ainsi que les déplacements imposés. Les chargements et les déplacements imposés peuvent être appliqués aux limites du modèle aussi bien qu'à l'intérieur de celui-ci.

### 14. Déplacements imposés



Les déplacements imposés (*Prescribed displacements*) sont des conditions spéciales qui peuvent être placées sur certaines lignes géométriques pour contrôler leurs déplacements. Les déplacements imposés peuvent être sélectionnés depuis le menu *Loads* ou en cliquant sur le bouton correspondant de la barre d'outils. La saisie des déplacements imposés est similaire à la création de lignes géométriques (paragraphe 3.3.1).

Par défaut, les valeurs des déplacements imposés sont fixées de manière à ce que la composante de déplacement verticale soit unitaire selon la direction des  $y$  négatifs ( $u_y = -1$ ), et que la composante horizontale soit libre.

Les valeurs des déplacements imposés peuvent être modifiées en double-cliquant sur la ligne géométrique correspondante et en choisissant *Prescribed displacements* dans la liste proposée. Apparaîtra alors une fenêtre de propriétés, dans laquelle les valeurs des déplacements imposés aux deux points extrêmes de la ligne géométrique pourront être changées. La distribution est toujours linéaire le long de la ligne. Les valeurs saisies doivent être comprises entre  $-9999$  et  $9999$ . Dans le cas où l'une des directions de déplacement serait imposée alors que l'autre direction est libre, l'utilisateur pourra se servir des cases de contrôle dans le groupe *Free directions*. Le bouton *Perpendicular* permet d'imposer un déplacement d'amplitude unité perpendiculairement à la ligne géométrique correspondante. Pour des lignes géométriques internes, la direction de déplacement est la perpendiculaire en direction de la droite à la ligne géométrique (en considérant que la ligne va du premier point au deuxième). Pour les lignes géométriques en limite du modèle, la direction de déplacement est dirigée vers l'intérieur du modèle.

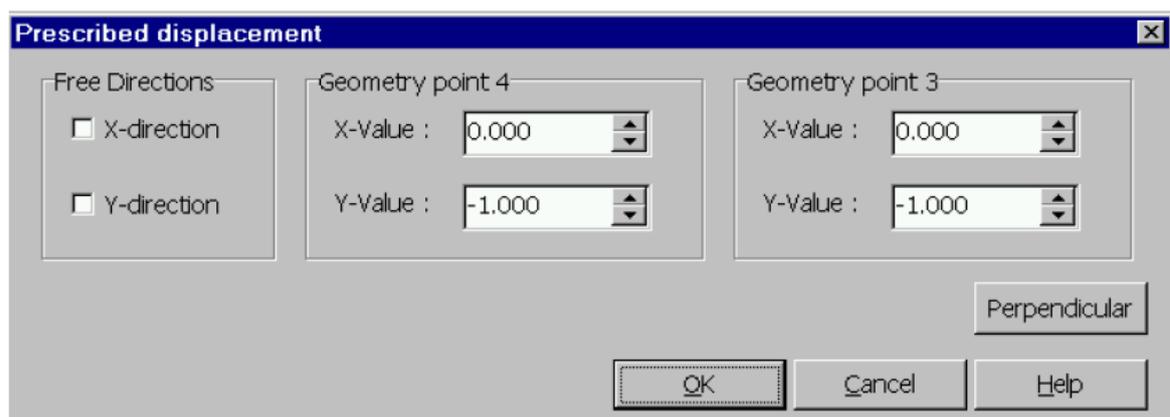


Figure 3.16 Fenêtre de saisie des données pour les déplacement imposés (*Prescribed displacements*)

Sur une ligne géométrique où sont imposés à la fois des déplacements et des charges, les déplacements imposés ont la priorité sur les charges au cours des calculs, sauf si les déplacements imposés ne sont pas activés. D'autre part, lorsque des déplacements sont imposés sur une ligne où les déplacements sont par ailleurs empêchés, le blocage des déplacements est prioritaire sur les déplacements imposés, ce qui signifie que les

déplacements sur cette ligne resteront nuls. Les déplacements imposés ne sont donc pas utilisés dans ce cas.

Bien que les valeurs des déplacements imposés puissent être spécifiées lors de la définition du modèle géométrique, les valeurs à appliquer lors des calculs peuvent être modifiées dans le cadre d'une construction par étapes (*Staged construction*) (paragraphe 4.7.4). De plus, il est possible d'augmenter (ou diminuer) globalement une combinaison existante de déplacements imposés par le biais des multiplicateurs de chargement  $Mdisp$  et  $\Sigma Mdisp$  (paragraphe 4.8.1).

Pendant les calculs, les forces de réaction correspondant aux déplacements imposés selon les directions  $x$  et  $y$  sont calculées et stockées comme des résultats de calcul (*Force-X, Force-Y*).

## 15. Le Blocage

Les blocages sont des déplacements imposés nuls. Ces conditions peuvent être appliquées sur des lignes géométriques comme sur des points. Les blocages peuvent être sélectionnés à partir du menu *Loads*. Dans le modèle géométrique, une distinction peut être faite entre les blocages horizontaux (*Horizontal fixity*) ( $u_x = 0$ ) et les blocages verticaux (*Vertical fixity*) ( $u_y = 0$ ). On peut également choisir un blocage total (*Total fixity*) qui est la combinaison des deux précédents ( $u_x = u_y = 0$ ).

### **Déplacements imposés et interfaces**

Pour introduire une transition brutale entre des déplacements imposés différents ou entre des déplacements imposés et des blocages (par exemple pour modéliser un problème de trappe comme sur la figure 3.17), il est nécessaire d'introduire une interface au point de transition perpendiculairement à la ligne géométrique. L'épaisseur de la zone de transition entre les deux déplacements imposés est alors nulle. Si aucune interface n'est utilisée, la transition se fait le long d'un élément relié au point de transition. La taille de la zone de transition sera alors déterminée par la taille de l'élément, et la zone de transition sera donc exagérément large.

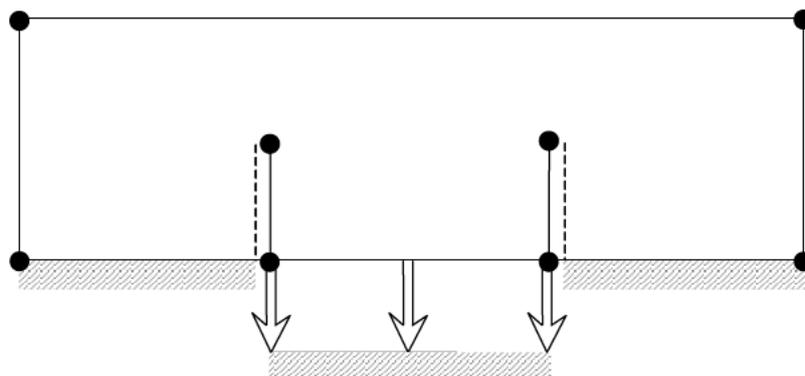


Figure 3.17 Modélisation d'un problème de trappe grâce à des interfaces.

## 16. Blocage standards



En sélectionnant les blocages standards (*Standard fixities*) depuis le menu des charges (*Loads*) ou en cliquant sur le bouton correspondant dans la barre d'outils, PLAXIS impose automatiquement un réglage standard des conditions aux limites générales du modèle géométrique. Ces conditions aux limites sont générées suivant les règles suivantes:

- Les lignes géométriques verticales pour lesquelles l'abscisse  $x$  est égale à la plus petite ou à la plus grande des abscisses  $x$  du modèle sont bloquées horizontalement ( $u_x = 0$ ).
- Les lignes géométriques pour lesquelles la cote  $y$  est égale à la plus petite ordonnée  $y$  du modèle sont entièrement bloquées ( $u_x = u_y = 0$ ).
- Les plaques qui s'étendent jusqu'aux limites du modèle géométrique sont bloquées en rotation ( $\phi_z = 0$ ) à la frontière si au moins une direction de déplacement en ce point est imposée.

Les blocages standards constituent une solution pratique et rapide pour la saisie des conditions aux limites de beaucoup d'applications.

## 17. Charges réparties



La création de charges réparties dans un modèle géométrique est similaire à la création d'une ligne géométrique (paragraphe 3.3.3). Deux systèmes de chargement (A et B) sont disponibles pour créer toute combinaison de charges réparties ou ponctuelles. Les systèmes de chargement A et B peuvent être activés indépendamment. Ils peuvent être sélectionnés à partir du menu *Loads* ou en cliquant sur le bouton correspondant de la barre d'outils.

Les valeurs des charges réparties sont spécifiées en force par surface (par exemple  $\text{kN/m}^2$ ). Les charges réparties peuvent avoir des composantes  $x$  et/ou  $y$ . Par défaut, en appliquant des chargements sur les limites géométriques du modèle, le chargement sera égal à une unité de pression perpendiculaire à la ligne considérée. La valeur d'un chargement peut être modifiée en cliquant sur la ligne géométrique correspondante et en sélectionnant le système de chargement correspondant. La fenêtre de propriétés des charges réparties (*Distributed loads*) s'ouvre alors. Il est possible d'y spécifier les deux composantes du chargement pour chaque extrémité de la ligne du modèle géométrique. La distribution est toujours linéaire le long de la ligne.

The dialog box titled "Distributed load - static load system A" contains two columns of input fields. The left column is for "Geometry point 0" and the right column is for "Geometry point 1". Each column has an "X-Value" field with a value of "0.000" and a "Y-Value" field with a value of "-1.000". Both fields are followed by the unit "kN/m²". Below the input fields is a "Perpendicular" button. At the bottom of the dialog are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Figure 3.18 Fenêtre de saisie des données pour les charges réparties (*Distributed loads*)

Bien que les valeurs des charges réparties puissent être spécifiées lors de la définition du modèle géométrique, les valeurs à appliquer dans les calculs peuvent être modifiées dans le cadre d'une construction par étape (*Staged construction*) (paragraphe 4.7.3). De plus, il est possible d'augmenter (ou diminuer) globalement une combinaison existante de charges par le biais des multiplicateurs de chargement  $MloadA$  (ou  $\Sigma MloadA$ ) pour le système de chargement A et  $MloadB$  (ou  $\Sigma MloadB$ ) pour le système de chargement B (paragraphe 4.8.1).

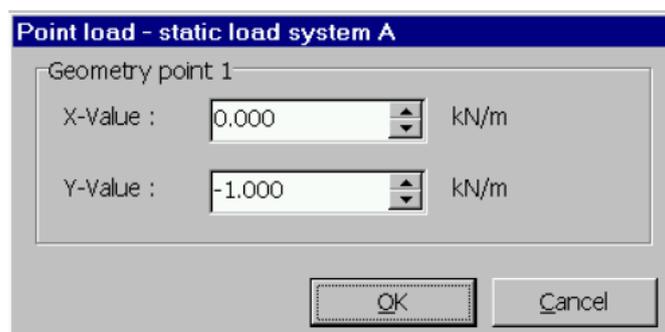
Sur une ligne géométrique où des déplacements et des charges réparties sont imposés simultanément, les déplacements imposés ont priorité sur les charges réparties pendant les calculs, à condition que les déplacements imposés soient actifs. Il n'est donc pas utile d'appliquer des charges réparties sur une ligne où des déplacements sont imposés. Si les déplacements sont imposés dans une seule direction ( $x$  ou  $y$ ), alors que l'autre direction est libre, il est possible d'appliquer des charges réparties selon la direction libre.

## 18. Charges ponctuelles



Cette option peut être utilisée pour créer des charges ponctuelles, qui sont en fait des chargements linéiques dans la direction perpendiculaire au plan. Les valeurs des charges ponctuelles sont indiquées en force par unité de longueur (par exemple kN/m). Dans les modèles axisymétriques, ce sont en fait des chargements linéiques sur une portion de cercle de 1 radian. Dans ce cas, la donnée est également indiquée en force par unité de longueur, sauf si la charge ponctuelle est localisée en  $x = 0$ . Dans ce cas (axisymétrie, charge ponctuelle en  $x = 0$ ), la charge ponctuelle est réellement une charge ponctuelle et sa valeur est à saisir comme une force (par exemple en kN, même si la fenêtre indique encore comme unité des kN/m). Notez que cette force n'agit que sur une portion de cercle de 1 radian. Pour dériver la donnée d'une situation réelle, la force ponctuelle réelle doit être divisée par  $2\pi$  pour obtenir la valeur de la force ponctuelle à appliquer au centre du modèle axisymétrique.

La création d'une charge ponctuelle ou linéique est similaire à celle d'un point géométrique (paragraphe 3.3.1). Deux systèmes de chargement (A et B) sont disponibles pour créer toute combinaison de charges réparties, linéiques ou ponctuelles. Les systèmes de chargement A et B peuvent être activés indépendamment. Ils peuvent être sélectionnés à partir du menu *Loads* ou en cliquant sur le bouton correspondant de la barre d'outils.



The image shows a dialog box titled "Point load - static load system A". It contains two input fields: "X-Value" with a value of "0.000" and "Y-Value" with a value of "-1.000". Both fields are followed by the unit "kN/m". At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figure 3.19 Fenêtre de saisie des données pour les charges ponctuelles (*Point loads*)

Les valeurs des charges ponctuelles (ou linéiques) sont spécifiées en force par unité de longueur (par exemple kN/m). Les charges ponctuelles peuvent avoir des composantes  $x$  et/ou  $y$ . Par défaut, en appliquant des chargements aux limites géométriques, le chargement sera unitaire selon la direction des  $y$  négatifs. La donnée d'un chargement peut être modifiée en cliquant sur le point correspondant et en sélectionnant le système de chargement correspondant dans le boîte de dialogue. La fenêtre de propriétés des

charges ponctuelles (*Points loads*) s'ouvre alors. Il est possible d'y spécifier les deux composantes du chargement.

Bien que les valeurs des charges ponctuelles puissent être spécifiées dans le modèle géométrique, la valeur à appliquer lors des calculs peut être modifiée dans le cadre d'une construction par étape (*Staged construction*). De plus, il est possible d'augmenter (ou diminuer) globalement une combinaison existante de charges par le biais des

multiplicateurs de chargement  $MloadA$  (ou  $\Sigma MloadA$ ) pour le système de chargement A et  $MloadB$  (ou  $\Sigma MloadB$ ) pour le système de chargement B (paragraphe 4.8.1).

Sur un élément de la géométrie où des déplacements et des charges ponctuelles sont appliqués simultanément, les déplacements imposés ont priorité sur les charges ponctuelles pendant les calculs, à condition que les déplacements imposés soient actifs. Il n'est donc pas utile d'appliquer des charges ponctuelles sur une ligne où des déplacements sont imposés. Si les déplacements sont imposés dans une seule direction (x ou y), alors que l'autre direction est libre, il est possible d'appliquer des charges ponctuelles selon la direction libre.

## 19. Blocage en rotation



Les rotations bloquées sont utilisées pour fixer le degré de liberté en rotation d'une plaque autour de l'axe z. Après la sélection de l'option *Rotation fixities* depuis le menu *Loads* ou en cliquant sur le bouton correspondant situé dans la barre d'outils, le ou les points géométriques pour lesquels on veut appliquer une rotation imposée devront être sélectionnés. Ceci ne peut être fait que pour les plaques, mais pas nécessairement sur des points géométriques existants : si un point de la plaque est sélectionné, un nouveau point géométrique sera créé automatiquement s'il n'existait pas encore.

Des rotations imposées peuvent être supprimées en sélectionnant la rotation imposée dans le modèle géométrique puis en appuyant sur la touche *Suppr* du clavier.

## 20. Drains



Les drains sont utilisés pour imposer des lignes au sein du modèle géométrique où les pressions interstitielles (surpressions) sont définies comme nulles. Cette option n'est utile que pour des analyses en consolidation ou des calculs d'écoulement. L'option *Drains* peut être sélectionnée à partir du menu *Geometry* ou en cliquant sur le bouton correspondant de la barre d'outils. La création d'un drain dans le modèle géométrique est similaire à celle d'une ligne géométrique (paragraphe 3.3.1).

Dans une analyse en consolidation, les surpressions interstitielles (*excess pore pressures*) sont annulées pour chaque nœud appartenant au drain, alors que dans un calcul d'écoulement, ce sont les pressions interstitielles (*active pore pressures*) qui sont fixées à zéro (à condition que le drain soit actif).

Les drains peuvent être activés ou désactivés dans les phases de construction en utilisant l'option de construction par étapes (*Staged construction*).

## 21. Puits



Les puits sont utilisés pour imposer des points à l'intérieur du modèle géométrique où un débit donné est pompé ou injecté. Cette option n'est utile que dans le cadre de calculs d'écoulement. L'option puits (*Well*) peut être sélectionnée à partir du menu *Geometry* ou en cliquant sur le bouton correspondant de la barre d'outils. La création d'un puits dans un modèle géométrique est similaire à celle d'un ancrage à tête fixe, mais n'est pas restreinte aux lignes géométriques existantes.

Après avoir créé un puits, il est possible de spécifier le débit voulu en double-cliquant sur le puits dans le modèle géométrique (il peut être nécessaire de zoomer la zone autour du puits). La fenêtre de propriétés du puits (*Well*) apparaît alors. Dans cette fenêtre, il est possible d'indiquer la valeur (positive) du débit, en unité de volume par unité de temps et

par unité de longueur perpendiculairement au plan. De plus, il faut spécifier si le puits est utilisé pour pomper (*Extraction*) de l'eau dans le sol (débit positif) ou pour injecter (*Infiltration*) de l'eau dans le sol (débit négatif).

Avant de réaliser un calcul d'écoulement, les puits peuvent être activés ou désactivés (paragraphe 3.9.1).

## 22. Propriétés des matériaux

Dans PLAXIS, les propriétés du sol et les propriétés des matériaux des structures sont toutes stockées dans une base de données. Il y a quatre types différents de matériaux : sols et interfaces (*Soil & Interfaces*), plaques (*Plates*), géogrilles (*Geogrids*) et ancrages (*Anchors*). A partir de la base de données, ces paramètres peuvent être assignés à des couches de sol, ou aux éléments de structure dans le modèle géométrique.

## 23. Base de données matériaux



La base de données des matériaux peut être activée en sélectionnant une des options dans le menu *Materials* ou en cliquant sur le bouton correspondant dans la barre d'outils. La fenêtre de la base de données des matériaux apparaît alors et affiche le contenu de la base de données du projet. La base de données du projet contient les matériaux du projet en cours. Pour un nouveau projet, cette base de données est vide. En plus de la base de données du projet, il existe une base de données globale. Celle-ci peut être utilisée pour stocker des propriétés de matériaux dans un répertoire global, accessible depuis l'ensemble des projets PLAXIS, ce qui permet d'échanger des informations entre différents projets. La base de données globale apparaît après un clic sur le bouton *Global* dans la partie supérieure de la fenêtre. La fenêtre est alors étendue comme celle présentée à la figure 3.20.

Les deux côtés de la fenêtre, base de données du projet (*Project data base*) et base de données globale (*Global data base*), comportent chacune une liste de matériaux. Au-dessus de la liste de gauche (base de données du projet), le type de matériaux (*Set type*) peut être sélectionné. Ce paramètre détermine lequel des quatre types de matériaux de la base de données est affiché dans la vue arborescente (*Soil & Interfaces*, *Plates*, *Geogrids*, *Anchors*). Les matériaux de cette vue arborescente sont identifiés par leur nom (défini par l'utilisateur). Les matériaux de type sols et interfaces peuvent être regroupés en fonction des modèles de comportement, des types de matériaux ou des noms des matériaux (utiliser l'option *Group order*). L'option *None* permet d'abandonner le regroupement sélectionné précédemment.

## 24. Modélisation du comportement d'un sol

Les sols et les roches tendent à se comporter d'une manière fortement non linéaire sous l'effet d'un chargement. Ce comportement non linéaire en contraintes-déformations peut être modélisé suivant différents niveaux de sophistication. Mais le nombre de paramètres à introduire dans les modèles augmente avec ce degré de sophistication.

Le modèle bien connu de Mohr-Coulomb peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Ce modèle, élastique parfaitement plastique, nécessite cinq paramètres fondamentaux qui sont : le module d'Young,  $E$ , le coefficient de Poisson,  $\nu$ , la cohésion,  $c$ , l'angle de frottement,  $\phi$ , et l'angle de dilatance,  $\psi$ . Comme les ingénieurs géotechniciens sont habitués à utiliser ces cinq paramètres, et qu'ils disposent rarement d'autres données, une attention particulière sera portée à ce

modèle classique de comportement. PLAXIS contient également des modèles de sols plus avancés ; ces modèles et leurs paramètres sont décrits dans le manuel *Material Models*.

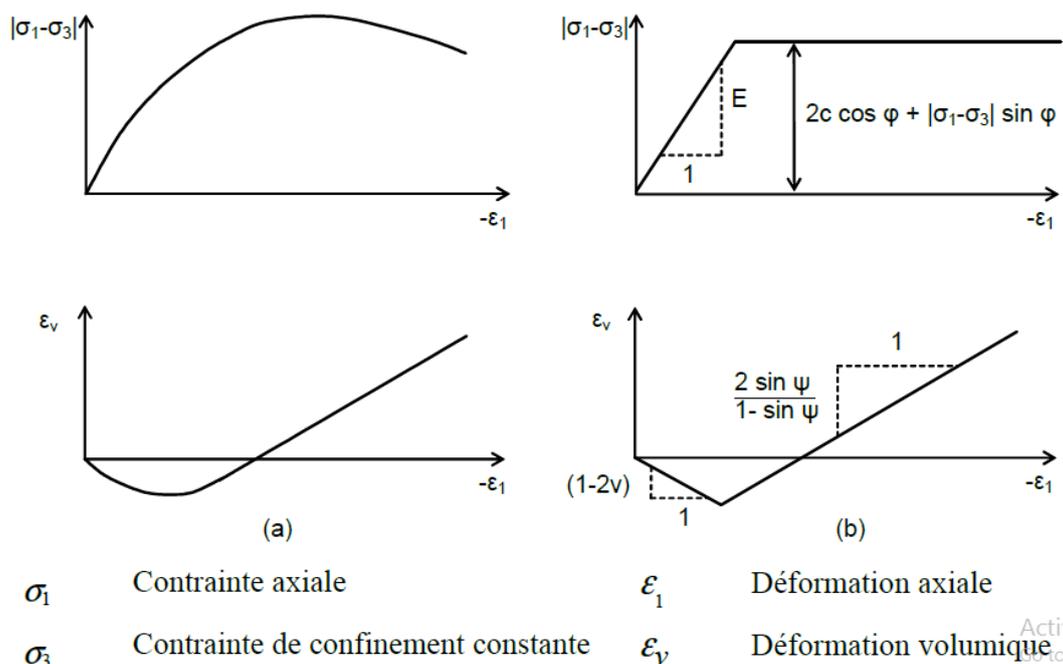


Figure 3.21 Résultats d'essais triaxiaux standards (a) et modèle élasto-plastique (b)

### ***Paramètres de base du modèle en relation avec le comportement réel du sol***

Afin de comprendre la signification des cinq paramètres fondamentaux du modèle, considérons des courbes contraintes-déformations classiques comme celles obtenues à partir d'essais triaxiaux drainés (voir figure 3.21). Le matériau a subi une compression isotrope jusqu'à une contrainte de confinement  $\sigma_3$ . Après quoi, la contrainte axiale  $\sigma_1$  est augmentée alors que la contrainte radiale reste constante. Au cours de cette seconde étape de chargement, les géomatériaux tendent à donner des courbes comme celles de la figure 3.21a. L'accroissement du volume (ou déformation volumique) est courant pour les sables et est aussi fréquemment observé pour les roches. La figure 3.21b montre ces mêmes résultats sous une forme idéalisée selon le modèle de Mohr-Coulomb. La figure donne une indication sur la signification et l'influence des cinq paramètres fondamentaux du modèle. Remarquons que l'angle de dilatance  $\psi$  est nécessaire pour modéliser l'irréversibilité de l'accroissement volumique.

## **25. Les modèles des matériaux**

PLAXIS propose différents modèles qui permettent de simuler le comportement d'un sol. Les modèles et leurs différents paramètres sont décrits en détail dans le manuel *Material Models*. Un commentaire rapide sur les modèles disponibles est donné ci-dessous:

### ***Modèle élastique linéaire:***

Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope. Le modèle comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young,  $E$ , et le coefficient de Poisson,  $\nu$ .

Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol.

### ***Modèle de Mohr-Coulomb:***

Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Ce modèle comporte cinq paramètres : le module d'Young,  $E$ , le coefficient de Poisson,  $\nu$ , la cohésion,  $c$ , l'angle de frottement,  $\phi$ , et l'angle de dilatance  $\psi$ .

### ***Modèle pour les roches fracturées (Jointed Rock model):***

C'est un modèle élasto-plastique anisotrope, pour lequel le cisaillement plastique peut se produire seulement dans un nombre limité de directions de cisaillement. Ce modèle peut être utilisé pour simuler le comportement des roches stratifiées ou fracturées.

### ***Modèle de sol avec écouissage (Hardening Soil Model) :***

C'est un modèle hyperbolique de type élasto-plastique formulé dans le cadre de la plasticité avec écouissage en cisaillement. De plus, ce modèle prend en compte l'écouissage en compression pour simuler le compactage irréversible d'un sol sous son premier chargement en compression. Ce modèle du deuxième ordre permet de simuler le comportement des sables, des graves, mais aussi de sols plus mous comme les argiles et les limons.

### ***Modèle pour les sols mous (Soft Soil model):***

C'est un modèle de type Cam-Clay qui permet de simuler le comportement de sols mous comme des argiles normalement consolidées ou de la tourbe. Ce modèle s'applique très bien aux situations où la consolidation primaire est prépondérante.

### ***Modèle pour les sols mous avec fluage (Soft Soil creep model):***

C'est un modèle du deuxième ordre formulé dans le cadre de la viscoplasticité. Ce modèle permet de simuler le comportement des sols mous, comme les argiles ou les tourbes normalement consolidées, en fonction du temps. Ce modèle prend en compte la compression logarithmique.

### ***Modèle défini par l'utilisateur***

Cette option permet de définir et d'utiliser des lois de comportement autres que les modèles standard de PLAXIS. Pour une description plus détaillée de cette option, veuillez vous reporter au manuel des modèles de matériaux (*Material Models Manual*).

### ***Les types de comportement des matériaux (Material type)***

En principe, dans PLAXIS, tous les paramètres de modélisation sont sensés représenter les caractéristiques effectives du sol, c'est-à-dire la relation entre les contraintes et les déformations pour le squelette solide. Une caractéristique importante des sols est la présence d'eau interstitielle. Les pressions interstitielles influencent significativement la réponse du sol. Pour permettre la prise en compte des interactions squelette solide-eau dans la réponse du sol, PLAXIS offre le choix entre trois types de comportements pour chaque modèle de sol:

#### ***Comportement drainé (Drained behaviour):***

Avec cette option, aucune surpression interstitielle n'est générée. C'est évidemment le cas pour des sols secs et pour des sols totalement drainés du fait

de leur forte perméabilité (comme les sables) et/ou à cause d'un faible accroissement du chargement. Cette option peut aussi être utilisée pour simuler le comportement du sol à long terme sans avoir besoin de modéliser l'histoire précise du chargement non drainé et de la consolidation.

### ***Comportement non drainé (Undrained behaviour):***

Cette option est utilisée pour permettre la génération complète des surpressions interstitielles. L'écoulement de l'eau interstitielle peut parfois être négligé du fait des faibles perméabilités (pour les argiles) et/ou à cause d'une vitesse de chargement élevée.

Toutes les couches considérées comme non drainées se comporteront ainsi, même si la couche ou une partie de celle-ci se trouve au-dessus de la nappe phréatique. Remarquons que les paramètres de modélisation à entrer sont les paramètres effectifs, i.e.  $E'$ ,  $\nu$ ,  $c'$ ,  $\phi$  et non pas  $E_u$ ,  $\nu_u$ ,  $c_u$  ( $s_u$ ),  $\phi_u$ . En plus de la raideur et de la résistance du squelette du sol, PLAXIS ajoute automatiquement un module de compressibilité pour l'eau et distingue les contraintes totales, les contraintes effectives et les surpressions interstitielles :

Activate \

### ***Le comportement non poreux (Non-porous behaviour):***

En utilisant cette option pour une couche de sol, aucune pression ni surpression interstitielle ne sera prise en compte dans cette couche. Cela peut s'appliquer à la modélisation du béton et des roches ou au comportement des structures. Le comportement non poreux (*Non-porous*) est souvent utilisé en combinaison avec le modèle élastique linéaire (*Linear elastic*). Il n'est pas nécessaire de fournir un poids volumique saturé ni des perméabilités pour les matériaux non poreux.

La caractéristique "non poreux" (*Non-porous*) peut aussi être appliquée à des interfaces. Pour empêcher tout écoulement à travers un écran de palplanches ou d'autres structures imperméables, on peut affecter aux interfaces placées autour un jeu de données spécifique où le type de matériau est choisi comme *Non-porous*.

## **26. Génération du maillage**



Lorsqu'un modèle géométrique est entièrement défini et que les propriétés des matériaux sont assignées à toutes les couches et à tous les éléments de structure, la géométrie doit être divisée en éléments finis afin de réaliser le calcul par éléments finis. Une composition d'éléments finis s'appelle un maillage d'éléments finis. Les éléments fondamentaux sont des éléments triangulaires à 15 nœuds ou des éléments triangulaires à 6 nœuds ; ces éléments sont décrits au paragraphe 3.2.2. En plus de ces éléments, il y a des éléments particuliers pour le comportement des structures (voir les paragraphes 3.3.2 à 3.3.7). PLAXIS permet une génération automatique des maillages d'éléments finis. Le générateur de maillage est une version spéciale du générateur de maillage Triangle développé par Sepra<sup>1</sup>. La génération du maillage est basée sur une procédure robuste de triangulation, ce qui se traduit par des maillages non structurés. Ces maillages peuvent paraître désordonnés, mais les performances numériques de tels maillages sont généralement meilleures que celles de maillages (structurés) réguliers.

La donnée nécessaire au générateur de maillage est le modèle géométrique composé de points, de lignes et de couches (surface délimitée par des lignes) ; ces dernières sont

générées automatiquement pendant la création du modèle géométrique. Les lignes et les points de la géométrie peuvent permettre d'influencer la position et la distribution des éléments.

La génération du maillage est lancée en cliquant sur le bouton de génération du maillage situé dans la barre d'outils ou en sélectionnant l'option *Generate* depuis le menu *Mesh*. La génération est aussi activée directement après la sélection d'une option d'affinage dans le menu *Mesh*.

Après la génération du maillage, le programme de résultats (*Output*) est lancé et une représentation du maillage est affichée. Bien que les éléments d'interface aient une épaisseur nulle, les interfaces sont dessinées avec une certaine épaisseur dans le maillage, afin de permettre de voir les jonctions entre les éléments du sol et les interfaces. Cette représentation des jonctions (*Connectivity plot*) est aussi disponible comme option de résultats (paragraphe 5.9.4). Le facteur d'échelle (paragraphe 5.4) peut être utilisé pour réduire l'épaisseur graphique des interfaces. Pour retourner au programme Input, il faut cliquer sur le bouton *Update*.

## 27. Conditions initiales

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage d'éléments finis généré, l'état de contraintes initiales et la configuration initiale doivent être spécifiés. Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales du programme d'entrée des données. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode des conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique).



La commutation entre ces deux modes se fait au moyen du bouton "bascule" dans la barre d'outils. Les conditions initiales permettent un retour au mode géométrique, mais cette opération est à déconseiller puisque des informations relatives aux conditions initiales seront perdues.

## 28. La nappe phréatique



Les pressions interstitielles et les pressions hydrauliques extérieures peuvent être générées à partir de nappes phréatiques. Une nappe phréatique représente des points où la pression de l'eau est égale à la pression atmosphérique. En utilisant une nappe phréatique, la pression de l'eau augmentera linéairement avec la profondeur en fonction du poids volumique de l'eau (c'est-à-dire que la variation de pression est hydrostatique). Avant d'entrer un niveau de nappe phréatique, l'utilisateur doit saisir le poids volumique de l'eau. L'option qui permet de générer des nappes phréatiques peut être sélectionnée à partir du menu *Geometry* ou en cliquant sur le bouton correspondant de la barre d'outils. La saisie d'une nappe phréatique est semblable à la création d'une ligne géométrique (voir 3.3.1).

Les nappes phréatiques sont définies par deux points ou plus. Ces points peuvent être saisis de la gauche vers la droite (sens des  $x$  croissants) ou vice-versa (sens des  $x$  décroissants). Les points et les lignes sont superposés au modèle géométrique, mais ils n'interagissent pas avec le modèle géométrique. L'intersection entre une nappe phréatique et une ligne géométrique existante ne crée pas de point géométrique supplémentaire.

Si une ligne phréatique ne couvre pas toute l'échelle des  $x$  du modèle géométrique, la nappe phréatique est considérée comme s'étendant horizontalement du point le plus à gauche jusqu'à moins l'infini et du point le plus à droite jusqu'à plus l'infini. Au-dessus de la nappe, les pressions interstitielles seront nulles, et en dessous, il y aura une distribution hydrostatique des pressions interstitielles, tout au moins lorsque la pression d'eau est générée à partir des niveaux phréatiques. La génération de ces pressions est réalisée en sélectionnant l'option *Generate water pressures* (voir 3.8.4).

## 29. Conditions aux limites dans les calculs d'écoulements

En plus de la génération de pressions interstitielles à partir des nappes phréatiques, les pressions hydrauliques peuvent aussi être générées à partir d'un calcul d'écoulement. Ceci nécessite la définition de conditions aux limites pour l'écoulement. En principe, il existe deux types de conditions aux limites : une valeur imposée du potentiel hydraulique ou une valeur imposée du débit perpendiculaire à la limite. Cette dernière condition peut être spécifiée uniquement comme un débit spécifique nul ce qui équivaut à une limite fermée pour les écoulements (*Closed flow boundary*).

## 30. Frontières imperméables à l'écoulement

 Une frontière imperméable à l'écoulement ("ligne fermée") est un objet qui peut être placé à la limite du modèle géométrique pour s'assurer qu'aucun écoulement n'apparaîtra au travers de cette limite. Cette option peut être sélectionnée en cliquant sur le bouton *Closed flow boundary* situé dans la barre d'outils ou en sélectionnant l'option correspondante depuis le menu *Geometry*. La saisie d'une frontière imperméable à l'écoulement est semblable à la création d'une ligne géométrique. Toutefois, une frontière imperméable à l'écoulement ne peut être placée que sur une ligne géométrique déjà existante à la limite du modèle géométrique. Lorsqu'une limite géométrique est indiquée comme étant une frontière imperméable à l'écoulement, il est toujours possible de définir aussi un potentiel hydraulique sur cette limite. Bien que ce potentiel hydraulique ne soit pas utilisé dans les calculs, il sera utilisé pour générer les pressions hydrauliques extérieures qui seront appliquées dans les analyses de déformations.

## 31. Surfaces de suintement

Les problèmes d'écoulement incluant une nappe phréatique libre peuvent faire apparaître des surfaces de suintement sur la surface aval, comme sur la figure 3.33. Une surface de suintement apparaîtra toujours lorsqu'une ligne phréatique touche une limite aval ouverte. La surface de suintement n'est pas une ligne de courant (contrairement à un niveau de nappe phréatique) ni une ligne équipotentielle. C'est une ligne sur laquelle la charge hydraulique  $h$  est égale à la cote  $y$  (= position verticale). Cette condition provient du fait que la pression de l'eau est nulle au niveau de la surface de suintement (même condition que pour le potentiel hydraulique).

Pour les surfaces de suintement, la charge hydraulique  $h$  doit être égale à la position verticale  $y$  (condition par défaut utilisée par PLAXIS). Il n'est pas nécessaire de connaître la longueur exacte de la surface de suintement avant de lancer les calculs, puisque la même condition aux limites ( $h = y$ ) sera utilisée au-dessus et en dessous de la nappe phréatique. Des nœuds ouverts avec  $h = y$  peuvent être spécifiés pour toutes les limites où la charge hydraulique est inconnue. Pour les limites situées bien au-dessus de la ligne phréatique où il est évident qu'aucune surface de suintement n'apparaîtra, il pourra être aussi approprié de considérer ces limites comme des limites fermées pour les

écoulements. Si aucune condition n'est spécifiée pour une ligne géométrique particulière, PLAXIS supposera que cette frontière est "ouverte" et lui attribuera la condition  $h = y$ .

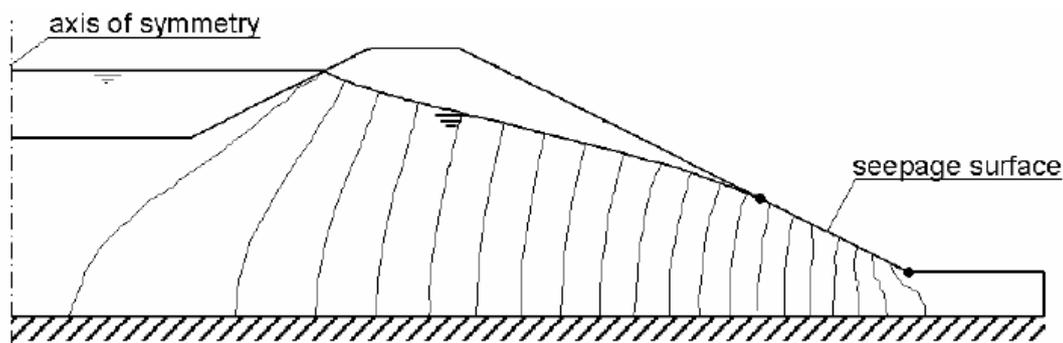


Figure 3.33 Ecoulement au travers d'un remblai avec l'indication d'une surface de suintement

Pour les surfaces de suintement, la charge hydraulique  $h$  doit être égale à la position verticale  $y$  (condition par défaut utilisée par PLAXIS). Il n'est pas nécessaire de connaître la longueur exacte de la surface de suintement avant de lancer les calculs, puisque la même condition aux limites ( $h = y$ ) sera utilisée au-dessus et en dessous de la nappe phréatique. Des nœuds ouverts avec  $h = y$  peuvent être spécifiés pour toutes les limites où la charge hydraulique est inconnue. Pour les limites situées bien au-dessus de la ligne phréatique où il est évident qu'aucune surface de suintement n'apparaîtra, il pourra être aussi approprié de considérer ces limites comme des limites fermées pour les écoulements. Si aucune condition n'est spécifiée pour une ligne géométrique particulière, PLAXIS supposera que cette frontière est "ouverte" et lui attribuera la condition  $h = y$ .

### 32. Générations des pressions hydrauliques



Après la saisie des nappes phréatiques ou la saisie de conditions aux limites pour un calcul d'écoulement, les pressions hydrauliques peuvent être générées. Ceci s'effectue en cliquant sur le bouton de génération des pressions hydrauliques (*Generate water pressures*) (croix bleues) situé dans la barre d'outils ou en sélectionnant l'option *Water pressures* depuis le menu *Generate*. Une fenêtre apparaît alors dans laquelle l'utilisateur doit spécifier s'il veut générer les pressions hydrauliques à partir de la nappe phréatique ou au moyen d'un calcul d'écoulement. La première option est rapide et directe alors que la seconde peut être plus réaliste mais requiert la saisie de plus de données et prend plus de temps.

### 33. Frontières de consolidation fermées



Il est possible de réaliser sous PLAXIS des analyses de consolidation pour calculer le développement des surpressions interstitielles dans le temps. Une analyse de consolidation implique des conditions limites supplémentaires pour les surpressions. Par défaut, toutes les limites géométriques sont 'ouvertes', ce qui signifie que l'eau peut s'écouler à travers ces limites. En d'autres termes, la surpression est nulle sur ces limites.

Toutefois, cette condition ne sera pas correcte pour certaines limites : par exemple, pour des limites verticales représentant un axe de symétrie ou si la limite inférieure du modèle géométrique est située dans une couche imperméable. Dans ces cas, il n'y a

aucun écoulement à travers la limite. Pour ces situations, l'option de frontière imperméable en consolidation (*Closed consolidation boundary*) peut être utilisée. Cette option peut être sélectionnée en cliquant sur le bouton *Closed consolidation boundary* situé dans la barre d'outils ou en sélectionnant l'option correspondante depuis le menu *Geometry*. La saisie d'une frontière imperméable en consolidation est semblable à la création d'une limite d'écoulement fermée (paragraphe 3.8.3)

Une frontière imperméable en consolidation n'implique pas automatiquement une limite fermée d'écoulement et vice-versa. Si un projet nécessite un calcul d'écoulement aussi bien qu'une analyse de consolidation, et qu'une partie de la frontière est imperméable, alors, en principe, une frontière imperméable pour l'écoulement et une autre pour la consolidation (*Closed consolidation boundary*) devront être appliquées à cette frontière. Il peut exister des situations pour lesquelles il faut considérer des conditions différentes vis-à-vis des écoulements et de la consolidation sur une certaine limite ; il faut alors faire la distinction entre les frontières imperméables à l'écoulement et en consolidation.

Lors de l'utilisation d'interfaces dans une analyse de consolidation, celles-ci sont, par défaut, totalement imperméables, ce qui signifie qu'il ne peut y avoir de dissipation des surpressions à travers ces interfaces. De cette façon, les interfaces ont un fonctionnement similaire à celui des limites fermées de consolidation (*Closed consolidation boundaries*), à l'exception du fait que les interfaces peuvent être utilisées à l'intérieur de la géométrie alors que les limites fermées de consolidation peuvent uniquement être définies aux limites de la géométrie. Si des interfaces sont définies dans le maillage, l'utilisateur peut vouloir empêcher explicitement toute influence des interfaces sur le processus de consolidation, par exemple dans le cas des interfaces placées autour des points anguleux des structures (paragraphe 3.3.5). Dans ce cas, l'interface doit être désactivée dans le mode de conditions hydrauliques (*Water conditions mode*). Ceci peut être fait indépendamment pour une analyse de consolidation ou un calcul d'écoulement. Pour les interfaces inactives, les degrés de liberté de la surpression interstitielle au niveau des paires de nœuds des éléments d'interface sont totalement couplés alors que les degrés de liberté des surpressions interstitielles sont totalement indépendants pour des éléments d'interface actifs.

En conclusion :

- Une interface active est totalement imperméable (séparation des degrés de liberté de surpression interstitielle au niveau des paires de nœuds).
- Une interface inactive est totalement perméable (couplage des degrés de liberté de surpression interstitielle au niveau des paires de nœuds).

Il n'est pas possible d'imposer des valeurs de surpression interstitielle comme condition aux limites pour une analyse de consolidation. Les surpressions au début d'une analyse de consolidation ne peuvent être que le résultat d'un calcul précédent pour lequel il existait des couches non drainées, c'est-à-dire des couches pour lesquelles le jeu de données comportait la donnée *Undrained*. Pour plus d'informations sur les analyses de consolidation, l'utilisateur pourra se reporter aux paragraphes 4.4.2 et 4.5.4 ainsi qu'au manuel scientifique (*Scientific Manual*).

### 34. Configuration de la géométrie initiale



Pour passer du mode de conditions hydrauliques (*Water conditions mode*) au mode de configuration géométrique (*Geometry configuration mode*), cliquez sur le 'bouton de basculement' droit de la barre d'outils.

### 35. Génération des contraintes initiales



Les contraintes initiales dans un sol sont influencées par le poids du matériau et par l'histoire de sa formation. Cet état de contraintes est caractérisé généralement par une contrainte effective verticale initiale  $\sigma'_{v,0}$ . La contrainte effective horizontale initiale  $\sigma'_{h,0}$  est liée à la contrainte effective verticale initiale par le coefficient de pression des terres au repos  $K_0$ . ( $\sigma'_{h,0} = K_0 \sigma'_{v,0}$ ).

### 36. Le programme de calcul



Cette icône représente le programme de calcul (*Calculations*). Celui-ci contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis. La fenêtre de sélection permet un choix rapide entre les quatre projets les plus récents. Si le projet choisi n'apparaît pas dans cette liste, il faut utiliser l'option <<<More files>>>. Dans ce cas, le gestionnaire de fichiers apparaît, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir un aperçu de tous les répertoires accessibles et de choisir le fichier de projet PLAXIS souhaité (\*.plx). Il n'est pas nécessaire de choisir un projet quand on clique sur le bouton *Calculate* depuis la fenêtre des conditions initiales du programme d'entrée des données. Dans ce cas, le projet en cours est automatiquement sélectionné dans le programme de calcul. Après la sélection (automatique) d'un projet, la fenêtre principale du programme de calcul apparaît ; elle comporte les points suivants (Figure. 4.1)