

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider– Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et hydraulique
Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة المدنية و الري
المرجع :

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de
Magister en génie civil

Option : Interaction sol-structure

**ANALYSE NUMERIQUE DE L'INFLUENCE DE LA
FLEXIBILITE ET DES MODES DE MOUVEMENT
D'UN ECRAN DE SOUTÈNEMENT SUR LES
PRESSIONS DE TERRE**

Présenté par :
MEFTAH Abdelmadjid

Soutenu publiquement le 02-12-2010

Devant le jury composé de :

Président :	Mr BENMEBAREK Sadok	Prof	Université de Biskra.
Directrice de mémoire :	M ^{me} BENMEBAREK Naima	Prof	Université de Biskra.
Examineur :	Mr BELOUNAR Lamine	MC	Université de Biskra.
Examineur :	Mr TATI Abdelouahab	MC	Université de Biskra.

INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages de soutènement sont des ouvrages courants de génie civil. Ils sont construits en nombre pour des usages aussi variés que le blindage de fouille pour la construction d'ouvrages souterrains (parking, voirie, soubassement d'immeubles...)

La détermination des forces agissantes entre le sol et les structures de soutènement est une étape importante dans l'ingénierie géotechnique. Une conception sécuritaire et économique d'un écran de soutènement nécessite une connaissance profonde des pressions de terre passive et active

Ce travail vise l'estimation numérique d'une part de l'influence des modes de mouvement observés en pratique et d'autre part l'influence de la flexibilité de l'écran de soutènement sur les diagrammes et les coefficients de pression des terres passives et actives

Le travail présenté dans ce mémoire aborde la problématique d'améliorer la prévision de la distribution des pressions agissantes sur un écran de soutènement rigide.

On cherche également à prévoir les effets de la flexibilité d'écran de soutènement sur les pressions des terres. En pratique, ce mémoire s'articule en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente brièvement les différents types de murs de soutènement qui sont classés selon leur mode de reprise de la poussée.

Le second chapitre récapitule brièvement les méthodes de dimensionnement des ouvrages de soutènement, leurs hypothèses et leurs limites. L'accent est porté sur les différentes méthodes de prises en compte des surcharges pouvant s'exercer sur le sol soutenu par l'écran,

Nous présentons dans le chapitre 3 une description des outils numériques (FLAC 2D) et des modèles de comportement utilisés dans la présente analyse.

Le chapitre 04 est consacré à l'étude de l'influence des modes de mouvement et la flexibilité d'écran sur les pressions passives et actives des terres, comporte deux parties :

La première partie, porte sur l'évaluation numérique respectivement des coefficients de pression des terres passive et active K_p , K_a et l'influence des modes de mouvement d'un mur de soutènement rigide soumis à trois types de mouvement translation, rotation par rapport à la base et rotation au sommet, en utilisant le logiciel FLAC 2D en différences finies explicites, nos résultats seront comparés avec les solutions existantes.

La deuxième partie, est consacrée à prévoir les effets de la flexibilité d'écran de soutènement sur les pressions des terres.

CHAPITRE 01

DIFFERENTS TYPES DE MURS DE SOUTÈNEMENT

1-1 Introduction :

Le mur de soutènement est un mur vertical ou sub-vertical qui permet de contenir des terres (ou tout autre matériau granulaire ou pulvérulent) sur une surface réduite. La retenue des terres par un mur de soutènement répond à des besoins multiples : préserver les routes et chemins des éboulements et glissement de terrain, structurer une berge naturelle en un quai (ports maritimes et voies navigables), parer en soubassement les fondations d'édifices de grande hauteur ou de digues, créer des obstacles verticaux de grande hauteur (murs d'escarpe et glacis dans les fortifications), soutenir des fouilles et tranchées de chantier pour travailler à l'abri de l'eau (batardeau), établir des fondations ou créer des parkings souterrains, etc. On trouve des murs de soutènement en pierres sèches, en moellons, en pierres de taille, en briques, en béton armé, en acier, voire en même bois ou en polymère.

1-2 Historique :

Dans les premiers besoins générant le mur de soutènement se trouve la fabrication de terrasses sur des terrains pierreux en pente pour un usage agricole, terrasses bordées de murs bas en pierres crues (pierres brutes mises sur assise sans mortier et en opus peu élaboré) récupérées par l'érosion des sols : ces murs sont édifiés pour combattre celle-ci (par exemple en Ardèche). Puis on trouve la construction de terrasses recevant des édifices imposants. Ces murs furent dès l'antiquité des murs massifs constitués en maçonnerie soignée de blocs de pierres (dont l'exemple évocateur est celui des temples en gradins Incas).

Dans sa version initiale de l'époque moderne le mur poids en béton qui succéda au milieu du XX^e siècle à la maçonnerie par appareillage du génie militaire ou civil, se compose d'un voile (mur mince) et d'une semelle. (Cette semelle varie en largeur suivant plusieurs facteurs dont

la surcharge sur la partie supérieure, le poids volumique et la qualité des sols de fondation, la pente du talus naturel du matériau retenu par le mur).

Depuis quelques décennies, les parois préfabriquées se sont largement substituées aux murs en béton coulé sur place et aux murs en maçonnerie appareillée, parce qu'elles sont meilleures, plus rapides et plus faciles à mettre en oeuvre, et plus favorables à l'environnement.

1-3 Principe du soutènement:

La principale considération dans le dimensionnement des soutènements, quelque soit leur type, est la correcte estimation de la *poussée des terres* ou du matériau retenu par cette paroi. Dans leur état naturel, les terres tendent à se conformer en un tas pyramidal conique à la façon d'un tas de sable présentant une pente de talus naturel. L'interposition d'un écran de soutènement dans un massif de terre se substitue à la partie manquante à la base et reçoit une partie du poids des terres restantes en une composante biaise de poussée qui tend à faire basculer et en même temps glisser le mur de soutènement disposé. Pour combattre cette poussée des terres, le mur peut être constitué de différentes façons.

- Opposer un poids supérieur à la partie remplacée en contrebalancement de la poussée tels sont les murs-poids
 - Être ancré dans un corps mort fournissant une inertie ou ancré plus loin dans le sol à proximité qui ne fait pas partie de l'ensemble susceptible de glissement ou a une meilleure composition afin que la poussée soit contenue, éviter le glissement et annuler le moment de basculement: ce sont les parois ancrées
 - Résister au basculement par une semelle insérée sous les terres, semelle de surface de base en rapport avec la hauteur fournissant le moment de renversement.
 - Réduire la poussée par un épaulement des terres retenues entre deux contreforts murs à redans
- Les murs de soutènement, quelque soit leur type, doivent en principe être drainés, car la pression de l'eau retenue derrière un mur sans interstices d'évacuation augmente d'autant la poussée sur l'ouvrage et modifie la "consistance" du matériau en le fluidifiant ce qui apporte une transmission de poussée d'une partie plus importante, la friction (phénomène de s'agripper) en résistance au glissement ayant partiellement disparu, la pente naturelle du tas diminue.

1-4 Différents types de murs de soutènement :

La notion « d'écran de soutènement » couvre l'ensemble des structures servant à retenir un massif de sol autour d'une excavation à l'aide d'éléments de matériaux résistants à la poussée des terres. Dans la définition de l'Eurocode (EC 7-1, 2004), un « ouvrage de soutènement » retient des terrains (sols, roches ou remblais) et/ou de l'eau.

L'effort de poussée exercé par le massif de terre retenu peut être repris de diverses manières. Trois modes principaux peuvent être distingués :

- Cas où la poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement ;
- Cas où la poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement ;
- Cas où la poussée est reprise par des ancrages.

1-4-1 Cas où la poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement :

Dans ce type d'ouvrage on trouve :

1-4-1-1 Des murs en béton ou en maçonnerie :

Ces ouvrages rigides ne supportent pas des tassements différentiels supérieurs à $2-3\text{‰}$. Les gabions ("sacs" de grillage remplis de gros cailloux) peuvent être assimilés à des murs, mais supportent eux des déformations importantes

1-4-1-2 Des ouvrages cellulaires :

Sont très variés et le type le plus ancien est le mur caisson en éléments préfabriqués. Dans les travaux maritimes, par exemple, on utilise pour la construction des quais de grands batardeaux cellulaires en palplanches métalliques ou de grands caissons en béton armé. Dans un ouvrage cellulaire, la cellule est remplie de sol et l'ensemble forme un ouvrage qui peut être, dans certains cas, très souple.

1-4-1-3 Le mur en terre armée :

Il s'agit d'une méthode de soutènement assez récente (1963) développée par Henri Vidal, qui consiste à utiliser le sol, et non un mur en béton pour assurer la stabilité d'un versant. Le concept est de renforcer le sol par l'ajout d'armatures qui solliciteront un frottement entre elles et les cailloux du remblai. Un massif en terre armée est constitué de trois composants :

- Un remblai granulaire compacté en couches peu épaisses.
- Les armatures disposées en lit dans le remblai qui peuvent être de deux natures :
 - 1- Les métalliques qui sont jusqu'à maintenant les plus répandues et des armatures en
 - 2- Géosynthétique qui ne présentent pas de problème de corrosion et qui tendent à remplacer les premières.
- Un parement, faisant le lien entre les armatures et assurant l'esthétique du mur, il est généralement réalisé en éléments de béton préfabriqué faciles à assembler, en pneus ou autres éléments récupérés destinés à être couverts de végétaux. L'ensemble forme un massif stable assurant la retenue de la poussée du sol en place.

***Avantages et limitations de la Terre Armée :**

Les avantages de la technique de la Terre Armée sont les suivantes :

- 1- Rapidité d'exécution ;
- 2- Murs souples pouvant supporter sans dommage des tassements différentiels importants ;
- 3- Construction ne nécessitant qu'un matériel très léger ;
- 4- Coût compétitif. La principale limitation à l'utilisation de cette technique est la qualité du remblai, qui doit être frottant.

1-4-2 Cas ou la poussée reprise par l'encastrement :

La poussée peut être reprise par l'encastrement de l'ouvrage dans le sol de fondation. On trouve dans ce type d'ouvrages :

1-4-2-1 Les murs cantilevers :

(dont la base élargie est encastrée dans le sol de fondation). Ces murs "fonctionnent" sous l'effet du poids du remblai. Un mur cantilever peut d'ailleurs être considéré comme un ouvrage poids si l'on y inclut le poids du remblai compris entre le mur et la verticale I passant

par l'extrémité arrière de la semelle figure 1-1. Les murs cantilevers en béton armé sont également des ouvrages rigides.

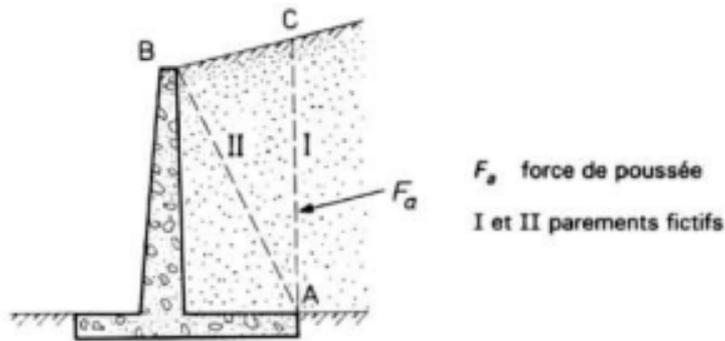


Figure 1-1 : Mur cantilever en béton armé

1-4-2-2 Les parois moulées :

La technique de la paroi moulée est largement utilisée dans les milieux urbains, elle permet d'atteindre des profondeurs de l'ordre de 100 mètres. Une paroi moulée fonctionne par encastrement total ou partiel dans le sol de fondation où les déformations liées aux interactions sol - structure doivent être soigneusement analysées, afin de s'assurer que les déplacements horizontaux et verticaux du sol ne risquent pas d'endommager les constructions existant à proximité.

Type /soutènement	parois moulées
Domaines d'emploi	Soutènement permanent
- Nature de terrain - Conditions hydrau	- Adaptable à tous les terrains sauf roches - Possibilité de travailler dans la nappe
Avantages	- Pas de décompression des terrains, pas de limitation en profondeur - Possibilité d'intégrer le soutènement dans la structure définitive. - Permet de réaliser la couverture avant les gros travaux
Inconvénients	- Nécessite une plate forme de travail horizontale - Matériel lourd. - Raccordement des radiers. - Ne permet pas une étanchéité extérieure.

1-4-2-3 les rideaux de palplanches :

Les rideaux de palplanches sont constitués de palplanches métalliques en général, emboîtées les unes dans les autres et battues dans le sol de fondation, pour former un écran vertical, le plus souvent rectiligne, servant de soutènement à un massif de sol.

Les rideaux de palplanches peuvent constituer des ouvrages provisoires ou définitifs. Leur caractéristique essentielle est que le soutènement ainsi formé est souple, ce qui nécessite une méthode spécifique de dimensionnement.

Les pressions exercées par le massif de terre à retenir peuvent être équilibrées par les forces de butée mobilisées dans la partie en fiche, si la hauteur hors fiche est faible.

Outre les sécurités classiques vis-à-vis d'une rupture de l'ouvrage par renversement ou grand glissement, la méthode consiste à vérifier que les déformations du rideau restent en tout point admissibles, c'est-à-dire que la contrainte maximale dans une palplanche ne dépasse pas le niveau de contrainte admissible pour l'acier,.

Les rideaux de palplanches ce sont des ouvrages de soutènement flexibles, où l'interaction structure-remblai a une influence prépondérante sur le comportement de l'ouvrage.

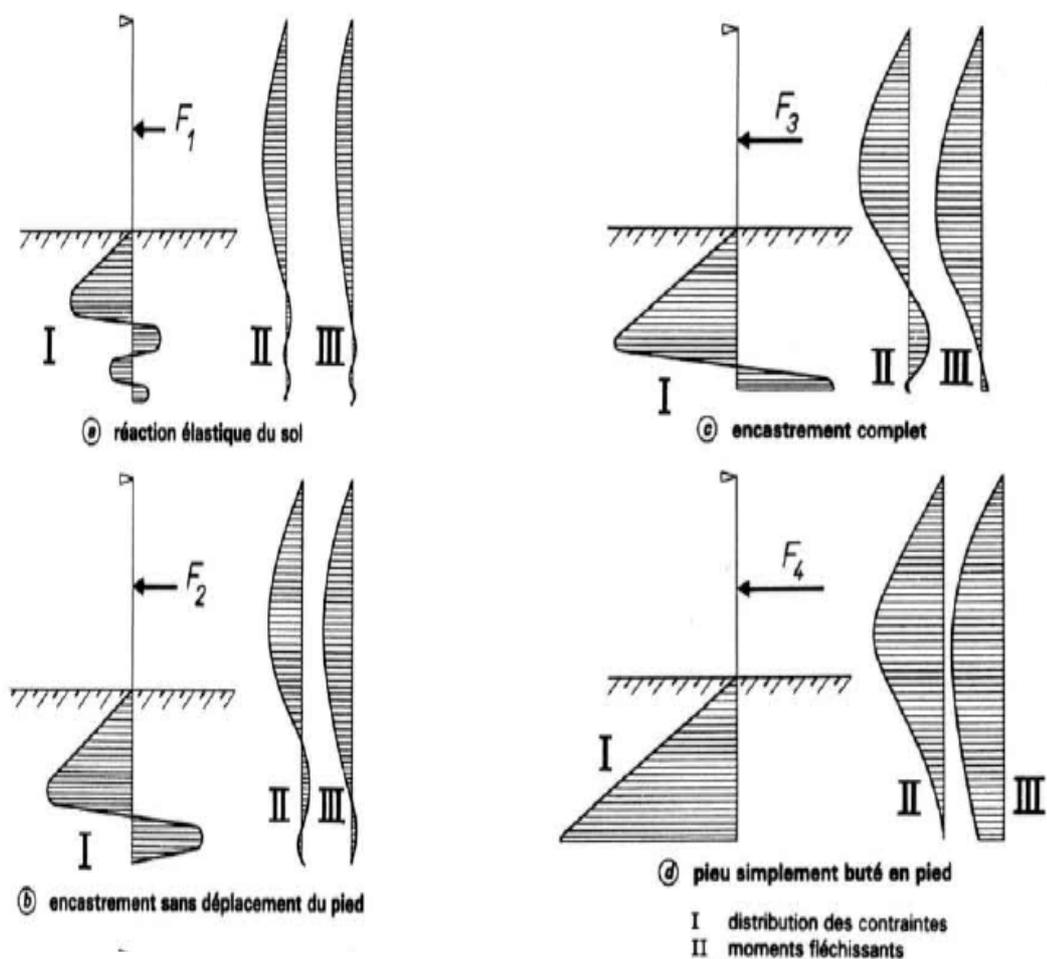


Figure 1-2 – Comportement d'un rideau ancré en tête, soumis à une force horizontale croissante

Type /soutènement	Rideaux de palplanches
domaines d'emploi	Soutènement Provisoire ou permanent
- Nature de terrain - Conditions hydrau	- Terrains meubles
Avantages	- Pas de décompression des terrains - Ecran semi-étanche.
Inconvénients	- Nuisances pour les riverains (bruit-vibrations) - Limitation de battage : terrain dur vestiges d'ouvrage souterrains. - En règle générale palplanches non récupérables.

1-4-3 Cas ou la poussée est reprise par des ancrages :

Dans les deux cas cités précédemment (poussée reprise par le poids ou l'encastrement), il est possible d'utiliser des tirants pour reprendre une partie de la poussée des terres. Les tirants sont très fréquents dans le cas des parois, pour limiter la profondeur à encastrent et reprendre provisoirement la poussée des terres. Après excavation les efforts seront repris par les planchers disposés entre les parois et souvent les tirants seront désactivés. Les ouvrages ancrés rencontrés sont donc :

- les murs ancrés ;

Le principe consiste à réduire les forces actives du glissement et à accroître les contraintes normales effectives sur la surface de rupture.

- les parois moulées ancrées; Dans le cas où les pressions exercées par le massif de terre à retenir ne peuvent être équilibrées par les forces de butée mobilisées dans la partie en fiche, si la hauteur hors fiche est importante. On a souvent recours à un système d'ancrage en tête au moyen de tirants.

- les palplanches ancrées; Dans le cas où les pressions exercées par le massif de terre à retenir ne peuvent être équilibrées par les forces de butée mobilisées dans la partie en fiche, si la hauteur hors fiche est importante. On a souvent recours à un système d'ancrage en tête au moyen de tirants.

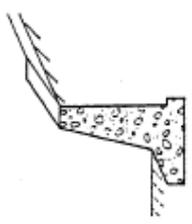
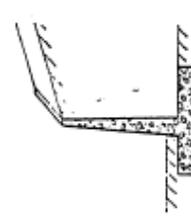
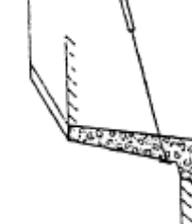
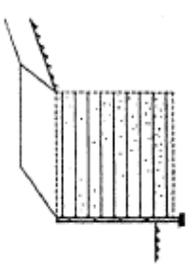
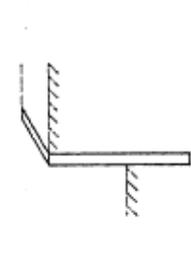
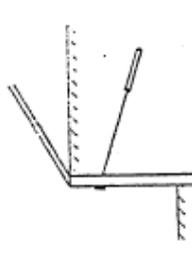
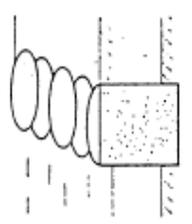
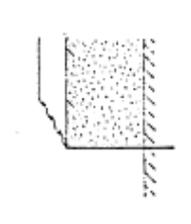
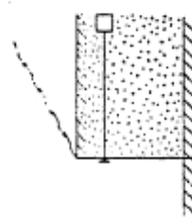
<i>Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée.</i>	
Mode de reprise de la poussée	Ouvrages de soutènement
Poids de l'ouvrage	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Mur poids en béton ou maçonnerie</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Mur cantilever en béton armé</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Mur en béton, ancré</p> </div> </div>
Encastrement	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Mur en terre armée</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Paroi moulée</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Paroi moulée ancrée</p> </div> </div>
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Ouvrage cellulaire</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Rideau de palplanches</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Rideau ancré</p> </div> </div>

Figure 1-3- Différents types de soutènements (d'après Schlosser)

1-5 Modes de rupture des ouvrages de soutènement selon l'EUROCODE 7:

1-5-1 Stabilité d'ensemble:

Les principes de la section 9 eurocod 7 doivent être appliqués de façon appropriée afin de démontrer qu'il ne se produira pas d'instabilité d'ensemble et que les déformations correspondantes sont suffisamment petites.

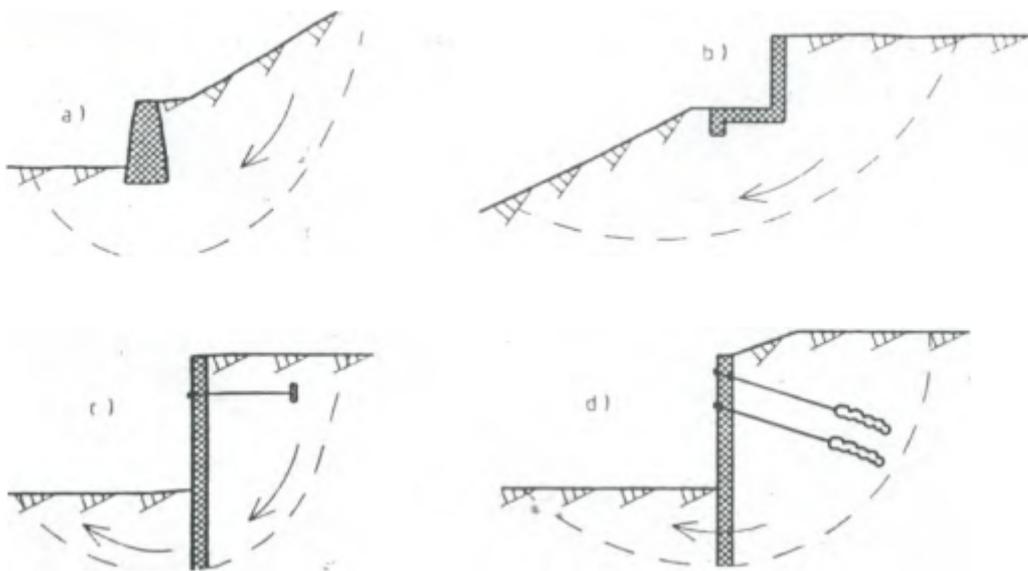


Figure 1-4 - Mode de rupture pour la stabilité d'ensemble des ouvrages de soutènement

1-5-2 Rupture du dol de fondation des murs-poids :

Les principes de la section 6 eurocod 7 doivent être appliqués de façon appropriée afin de démontrer que l'on est suffisamment loin des conditions de rupture du sol de fondation et que les déformations correspondantes seront suffisamment petites. Aussi bien le défaut de capacité portante que le glissement du mur doit être considéré.

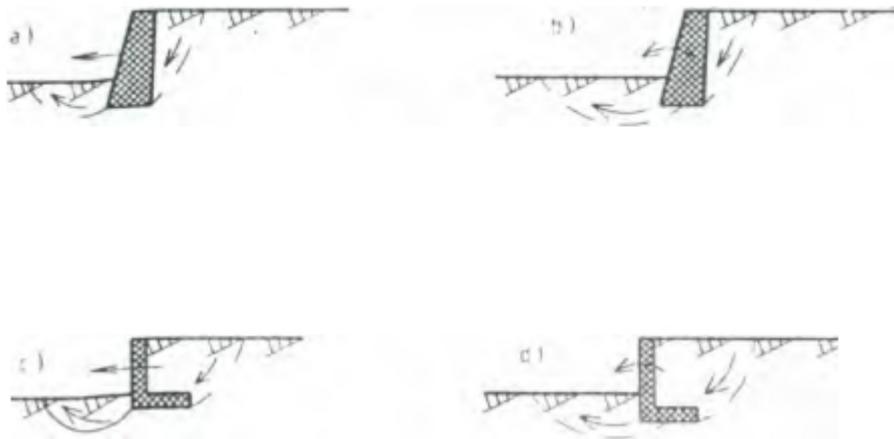


Figure 1-5- Rupture du sol de fondation des murs poids

1-5-3 Rupture rotationnelle des murs encastrés :

Il doit être démontré par des calculs d'équilibre que les murs (parois et rideaux) doivent être encastrés suffisamment dans le sol pour éviter une rupture rotationnelle.

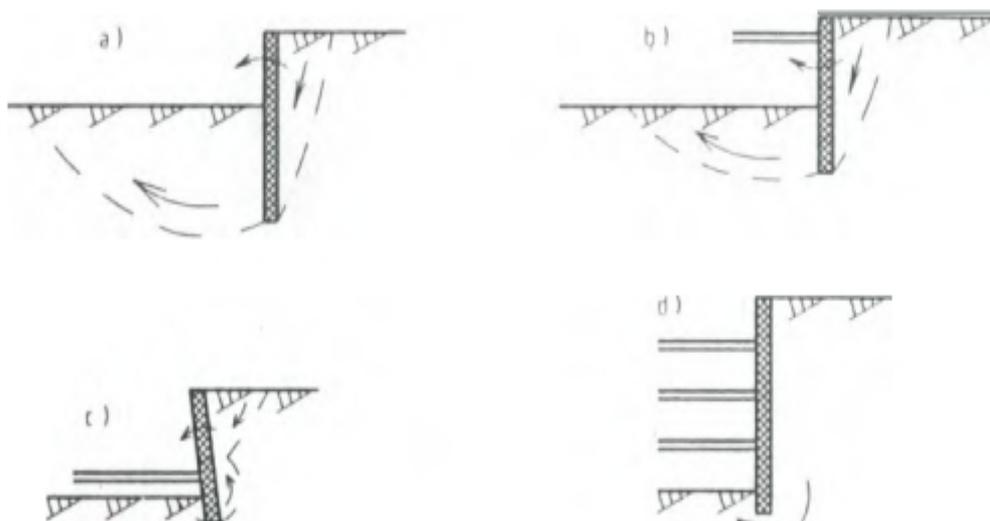


Figure 1-6 -Ruptures rotationnelles des murs encastrés

1-5-4 Rupture verticale des murs encastrés :

Il doit être démontré que l'équilibre vertical peut être obtenu en utilisant les résistances au cisaillement de calcul des sols et les forces de calcul verticales exercées sur le mur.

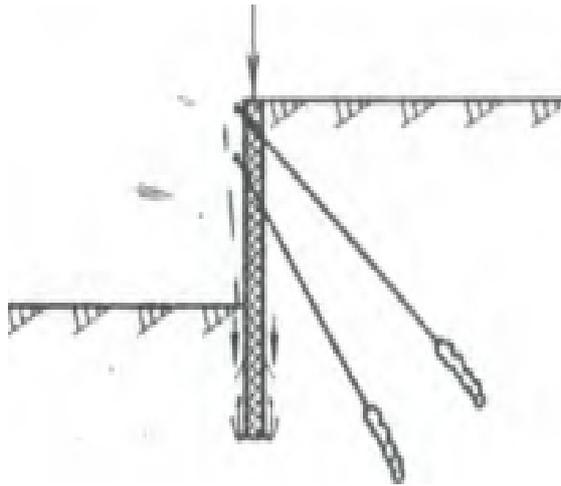


Figure 1-7 - Rupture verticale des murs encastrés

1-5-5 Rupture par des éléments de structure des murs de soutènement :

Les ouvrages de soutènement et leurs éléments de structure porteur tels que les ancrages et les butons doivent être vérifiés vis-à-vis de la ruptures des éléments de structure. Il doit être démontré que l'équilibre peut être atteint sans excéder les résistances de calcul du mur et des éléments de structure porteurs tels que les butons et les ancrages.

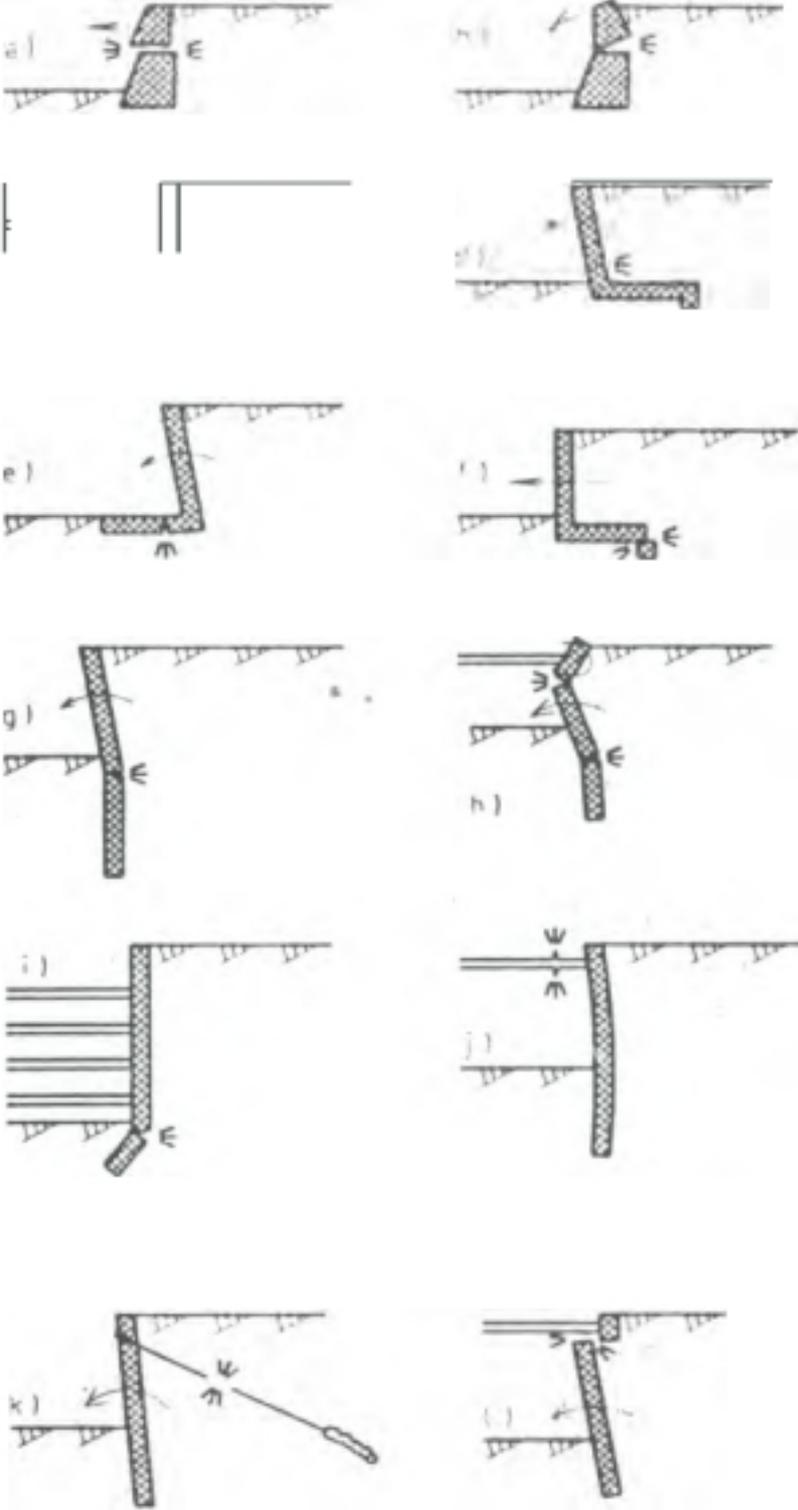


Figure 1-8 - Rupture par des éléments de structure des murs de soutènement.

1-5-6 Rupture par arrachement des ancrages :

Il doit être démontré que l'équilibre peut être obtenu sans rupture par arrachement des ancrages.

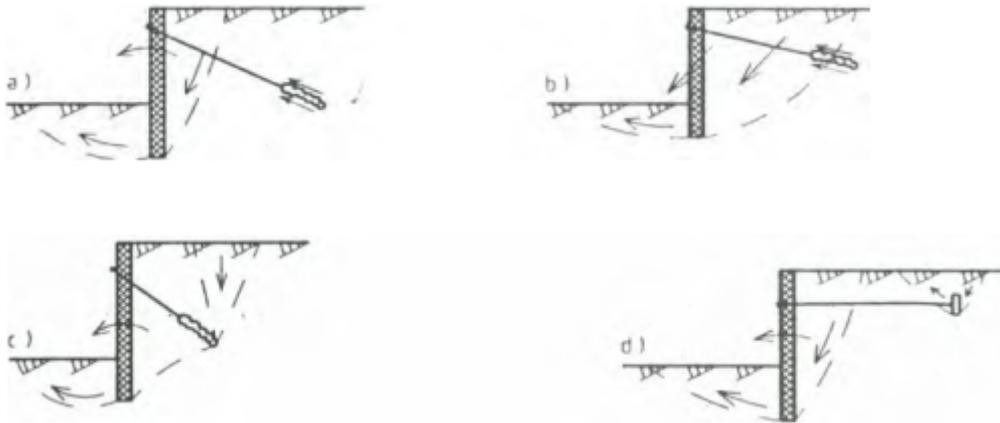


Figure 1-9 - Rupture par arrachement des ancrages

1-6 Distribution des pressions appliquées à l'ouvrage de soutènement par les terres soutenues :

1-6-1 Ouvrages de soutènement flexible :

Tschebotarioff et Brown [1948], puis Rowe [1952, 1961] et Masrouri [1986] prolongèrent l'étude expérimentale faite par Stroyer [1935]. En procédant également à des essais sur modèles réduits d'écrans souples. Les travaux de Tschebotarioff permirent de mettre en évidence que les redistributions de poussée par effet de voûte n'apparaissent que pour des écrans mis en fiche sur toute leur hauteur, ancrés rigidement en tête (à une plate-forme, en l'occurrence), puis dragués figure 1-10 et que de telles redistributions de poussée n'ont pas lieu d'être considérées pour des écrans remblayés ou ancrés à l'aide de tirants présentant une relative souplesse.

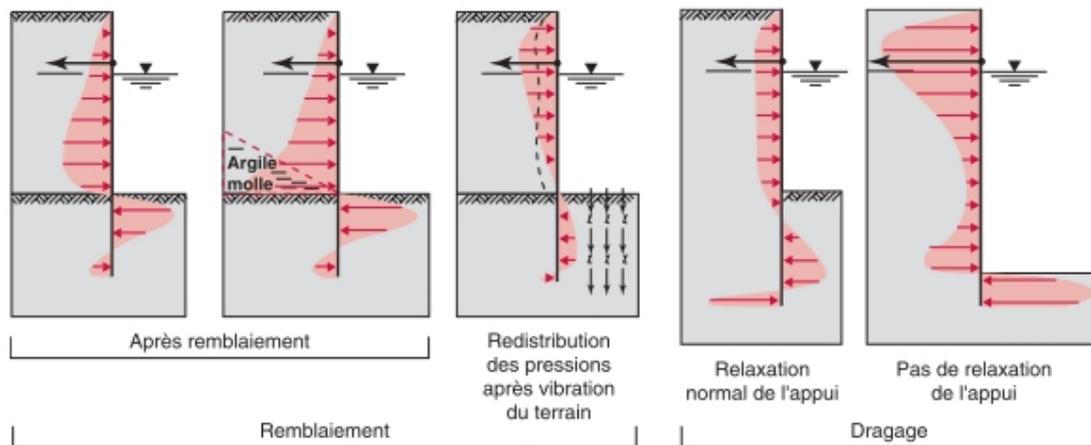


Figure 1-10- Distributions de pressions trouvées à l'issue de différentes procédures de construction [D'après Tschebotarioff et Brown, 1948].

1-6-1-1 Influence du mode de chargement :

Dans le cas d'un rideau souple, si le point de butonnage ou d'ancrage reste fixe, la distribution de la pression des terres est fonction du mode de chargement du rideau :

- * Avant tout terrassement ou dragage elle est triangulaire ($\delta = 0$) ;
- * Si le rideau est sollicité par excavation, cette répartition n'est pas conforme aux théories classiques, et n'a pas une allure triangulaire. Elle augmente au voisinage du point d'ancrage, et elle diminue vers le milieu de la hauteur libre de l'écran (l'effet de voûte, Rowe 1952). La déflexion du rideau dans sa partie centrale engendre des contraintes de cisaillement horizontales dans le massif ;
- * Si le rideau est sollicité par surcharge surfacique : La répartition des contraintes horizontales issues de la surcharge est présentée sur la figure 1-11. Ce diagramme se superpose au diagramme de poussée issu du poids des terres soit dans sa forme brute, soit dans une forme trapézoïdale simplifiée.

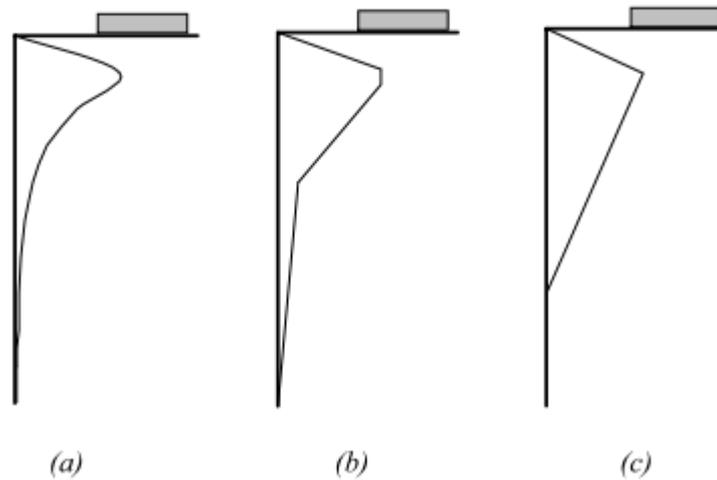


Figure 1-11- Répartition des contraintes horizontales dues à une surcharge surfacique d'après la théorie élastique de Boussinesq

- (a) répartition théorique
- (b) (c) diagrammes équivalents

1-6-1-2 Influence de longueur de fiche:

Pour un écran de soutènement ancré en tête par une nappe de tirants, Blum analyse, pour différentes longueurs de fiche, les distributions des pressions sur l'ouvrage, des moments fléchissants et des déplacements horizontaux de l'ouvrage. Cette analyse est essentiellement qualitative et repose sur l'interdépendance de ces distributions (la déformée de l'écran présente un point d'inflexion pour les points de moments nuls, de même que la courbe des moments pour les points de pressions nulles ; la pression mobilisée est liée au déplacement latéral de l'écran). Cette analyse permet à Blum d'observer que les ouvrages qui présentent une fiche courte seront simplement butés par le sol et que l'augmentation de la fiche conduite à la mobilisation d'un encastrement dans le sol figure 1-12.

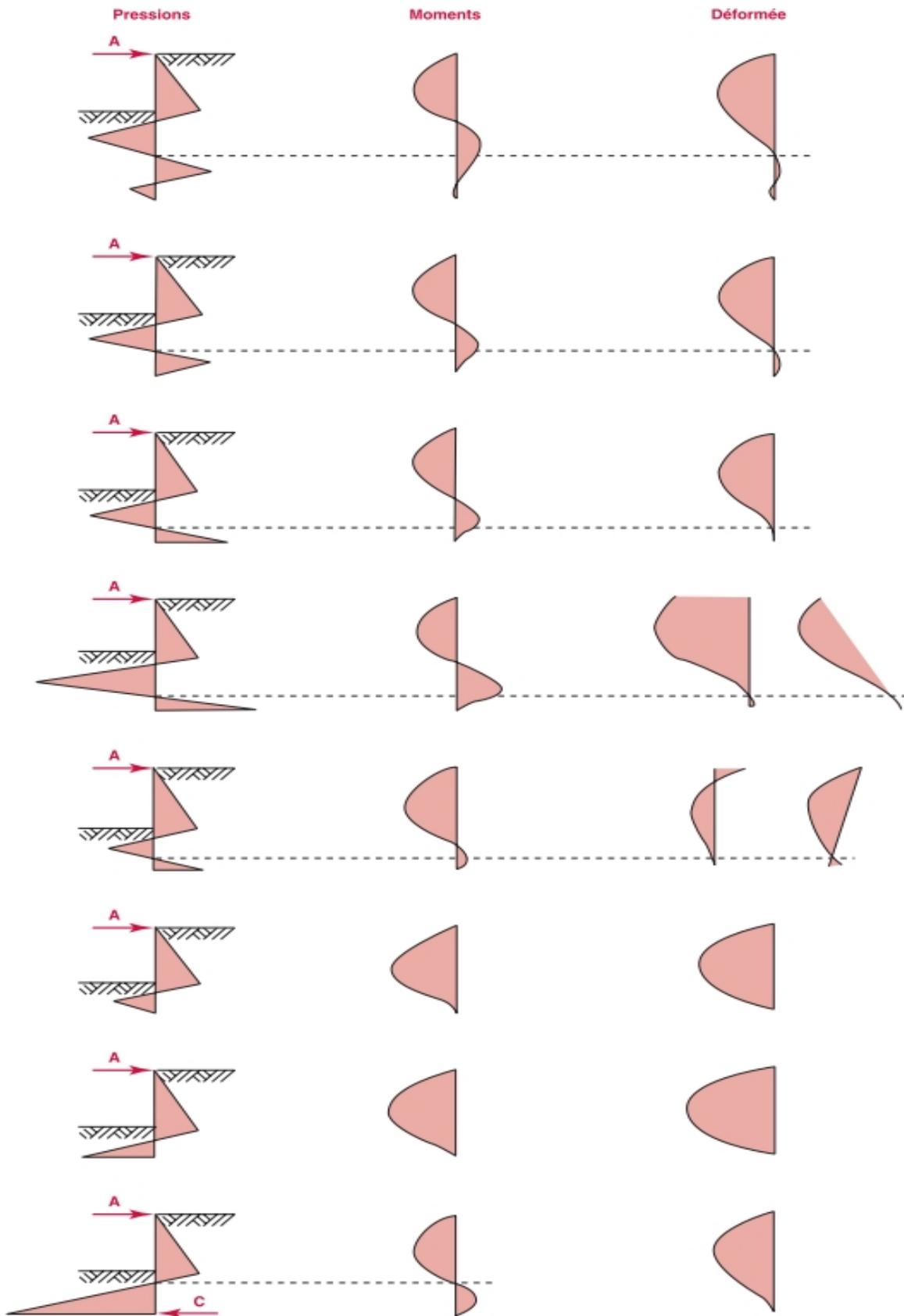


Figure 1-12- Influence de la longueur de la fiche sur les pressions sur l'écran, les moments fléchissants auxquels il est soumis et sa déformée (d'après Blum, 1931).

1-6-2 Ouvrages de soutènement rigide :

L'analyse de la cinématique de ces fouilles butonnées, complétée par une série d'expériences menées sur un mur en semi-grandeur soumis à des mouvements de différentes natures, permit à Terzaghi [1934, 1936a] de mettre en relation la distribution des pressions sur les soutènements avec la cinématique générale de l'ouvrage figure 1-13.

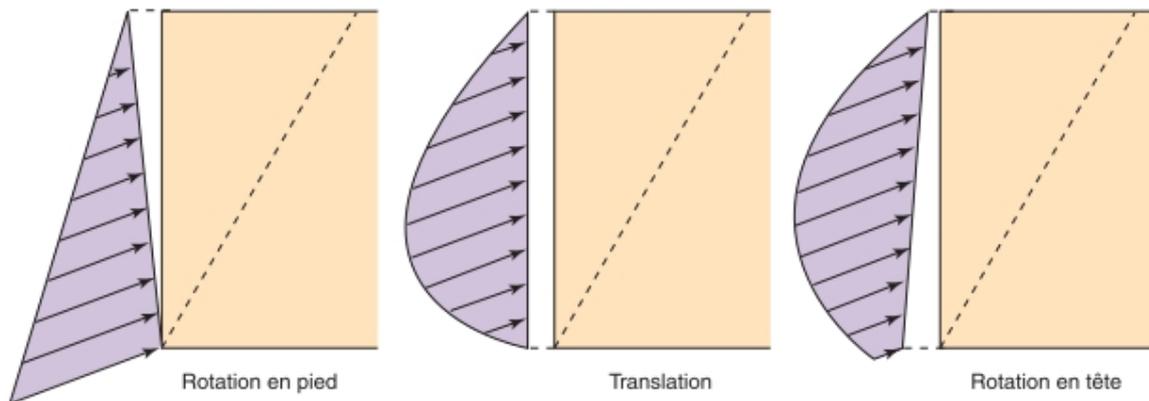


Figure 1-13- Dépendance du diagramme des pressions appliquées par le sol à la cinématique de l'écran d'après Terzaghi, in Ohde, 1938

Les résultats obtenus concernent principalement la distribution des pressions appliquées à l'écran pour les trois cinématiques de l'écran : translation, rotation par rapport au pied et rotation par rapport à la tête.

Concernant le mouvement de translation, Sherif et al. [1982], ainsi que Fang et al. [1997], ont montré que la répartition des pressions au cours du mouvement de l'écran restait sensiblement triangulaire. Ce résultat est nuancé par Fang et Ishibashi [1986], pour qui la distribution de pression s'écarte légèrement de la distribution triangulaire, les pressions étant un peu plus fortes qu'attendues avec cette distribution en partie supérieure de l'écran et un peu plus faibles dans la partie inférieure de l'écran.

Pour les ouvrages pivotant à la tête, La répartition des pressions appliquées par le sol à l'écran pour cette cinématique d'ouvrage a été étudiée, toujours sur modèles réduits, par Fang et Ishibashi [1986]. Ils observent que, lors de la rotation de l'écran, partant de l'état « au repos », les efforts appliqués en tête de l'écran ont tendance à augmenter tandis qu'ils ont tendance à diminuer dans la partie inférieure. Ils mettent ainsi en évidence des répartitions de pression pour lesquelles, dans le quart supérieur du mur, la pression est largement supérieure à la pression des terres au repos, tandis que, dans la partie médiane, cette pression est proche de la

poussée théorique, et que, dans le quart inférieur, cette pression diminue jusqu'à prendre des valeurs proches de zéro en pied de mur.

Pour les ouvrages pivotant en pied, enfin, ils observent qu'au cours de la rotation du mur, les pressions diminuent moins vite dans la partie inférieure du mur que dans la partie supérieure. Ainsi, ils montrent que le mouvement du mur conduit à développer un état d'équilibre limite dans la partie supérieure du massif de sol (environ la moitié supérieure), tandis que, dans la moitié inférieure, l'état du sol reste intermédiaire entre l'état de poussée et l'état au repos.

Ainsi, les ouvrages de type poids, chargés par remblaiement du sol, ont tendance à tourner par rapport à leur base, autorisant une forte décompression latérale du sol à la surface du terrain soutenu, décompression latérale qui diminue avec la profondeur jusqu'à une valeur nulle à la base du mur.

Pour Terzaghi, cette cinématique permet une déformation relativement homogène au sein du prisme de sol soutenu par l'ouvrage, qui se trouve ainsi amené à un état d'équilibre de poussée. Pour des ouvrages qui se déplacent en translation, cinématique proche de celle observée pour les fouilles blindées, ou pour des ouvrages qui pivotent par rapport à un point situé en tête, la décompression latérale du sol en arrière de l'écran n'est pas homogène et présente des valeurs plus fortes à la base de l'écran qu'en partie supérieure. Pour Terzaghi, ce schéma de déformation du massif conduit à des distributions de pression sur l'écran qui ne sont plus triangulaires. En effet, dans le cas où le déplacement de l'écran dans sa partie supérieure n'est pas suffisant pour autoriser, à ce niveau, la décompression latérale de la masse de sol intéressée par la mobilisation de la poussée, on assiste à l'apparition d'un « effet de voûte » qui a pour conséquence d'augmenter les efforts de poussée dans la partie supérieure de l'écran et de les réduire dans la partie inférieure.

1-7 Résistance au cisaillement du sol :

La résistance au cisaillement du sol est l'un des paramètres les plus importants dans l'étude de la stabilité d'un ouvrage de soutènement. En dehors des sols pulvérulents où seul intervient l'angle de frottement interne φ , les sols comportant une partie notable de fines ont une résistance au cisaillement dépendant à la fois de leur état de saturation et de la rapidité de la sollicitation de cisaillement.

Pour un sol fin saturé, la résistance à court terme est caractérisée par la seule cohésion non drainée c_u , l'angle de frottement étant alors nul ($\varphi_u = 0$). Par contre, la résistance effective ou à long terme est caractérisée par deux paramètres : c' la cohésion effective et φ' l'angle de frottement interne effectif (Cf. Article Résistance au cisaillement [C 216] dans cette rubrique).

Pour le calcul des efforts de poussée ou de butée d'un sol non saturé on prendra généralement la résistance effective (c' , φ') mesurée sur le sol saturé.

Dans le cas d'un sol fin saturé (limon, argile), il sera parfois nécessaire de faire deux calculs, l'un à court terme correspondant aux conditions juste après la construction, l'autre à long terme correspondant aux conditions dans lesquelles les surpressions interstitielles se sont dissipées, soit quelques semaines à quelques mois après la construction. C'est le cas des parois exécutées dans le sol en place avec excavation. Cependant l'expérience montre que c'est le calcul à long terme et en contraintes effectives (c' , φ') qui est le plus défavorable, aussi se contente-t-on souvent de ce seul calcul. Il convient d'être prudent sur la prise en compte de la cohésion effective c' dans le cas des sols saturés. On la néglige souvent dans le calcul de la poussée considérant qu'elle peut être facilement détruite sous l'effet, notamment, des déplacements de l'ouvrage.

1-8 Conclusion :

Cette rapide étude bibliographique montre les difficultés aussi bien théoriques qu'expérimentales de détermination de comportement des soutènements semi flexibles et flexibles par contre la détermination de comportement des soutènements rigides est moins complexe

Le soutènement comprend non seulement l'écran lui-même mais aussi un système d'appuis. Dans le cas général, les appuis sont constitués, d'une part, par le sol dans la partie en fiche de l'écran et, d'autre part, par des ancrages vers l'arrière ou des butons devant l'écran.

Les rideaux de palplanches et les parois moulées ont des comportements analogues lorsqu'ils jouent le rôle d'écran de soutènement et sont de ce fait justiciables des mêmes méthodes de calcul.

Dans tous les cas, trois facteurs doivent être pris en considération pour la modélisation

- les caractéristiques du sol,
- les caractéristiques de l'écran,
- les caractéristiques de la surcharge.

L'importance relative de ces trois facteurs sur les pressions exercées sur l'écran reste cependant à préciser.

Le choix du soutènement n'est pas seulement lié aux exigences du terrain, mais aussi au souci de protection du personnel travaillant sur chantier.

L'objet de cette partie est de présenter les règles essentielles de conception générale des ouvrages de soutènement. Il est à noter que la première partie qui décrit les principaux types d'ouvrages présente aussi certaines dispositions les concernant.

En tout état de cause, il est important de noter qu'il y a lieu en règle générale d'associer au plus tôt dans la conception d'un ouvrage les principaux intervenants, et notamment :

- Le bureau d'études ;
- Le conseil en géotechnique ;
- L'architecte et le paysagiste ;
- Le coordonnateur de sécurité ;
- Le futur exploitant.

Cette étude bibliographique restreinte témoigne de la complexité des problèmes de soutènement. La complexité de l'interaction sol-structure dans le fonctionnement des ouvrages de soutènement fait qu'il n'existe pas aujourd'hui de consensus sur l'utilisation de ces règles, ni sur leur mise en œuvre. Il est constaté qu'il n'existe toujours pas de règlement algérien pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement.

LES METHODES DE DIMENSIONNEMENT DES ECRANS DE SOUTÈNEMENT

2-1 Rappels sur les pressions latérales de la terre :

L'analyse de la pression latérale des terres est d'un aspect très important en mécanique des sols. Les applications sont très diverses et s'étendent du dimensionnement des ouvrages de soutènement jusqu'à l'étude de la stabilité des pentes et des talus. Les hypothèses généralement admises sont un état de déformation plane et un comportement rigide-parfaitement plastique car l'écoulement par cisaillement se produit à contrainte constante.

2-1-1 Catégories de pression latérale de la terre :

Il y a trois catégories de pression latérale de la terre et chacune dépend du mouvement éprouvé par le mur vertical sur lequel la pression agit. Les trois catégories sont:

- Etat de repos du sol.
- Etat de poussée du sol (Pression active de la terre).
- Etat de butée du sol (Pression passive de la terre).

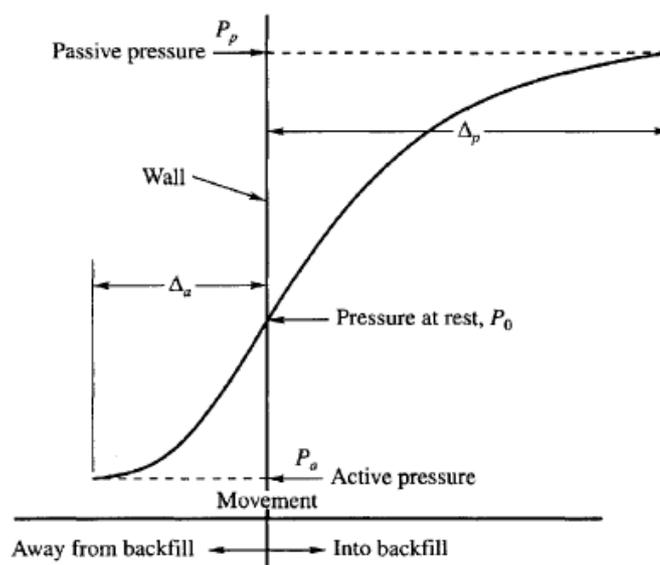


Figure.2-1- Développement des pressions actives et passives de la terre

2-1-1-1 Etat de repos du sol :

L'état des contraintes dans le sol n'est pas hydrostatique: la contrainte horizontale ou latérale n'est pas égale à la contrainte verticale. En mécanique des sols, la contrainte latérale totale est définie en fonction de la contrainte verticale totale par la relation:

$$\sigma_h = K \sigma_v$$

Où **K** est dit coefficient de la pression des terres. Puisque les contraintes totales peuvent changer selon le degré de saturation du sol, le coefficient **K** n'est pas constant pour un sol donné. C'est pour cette raison que nous écrivons cette relation en termes de contraintes effectives: $\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$

K₀ est le coefficient des terres au repos. Il est indépendant de l'état de saturation du massif. Il est constant pour une même couche de sol et une même masse volumique. De ce fait, ce coefficient est très important pour l'analyse de stabilité et la conception des différents ouvrages. Lorsque le sol subit des déformations, on parle de coefficient de pression latérale tout court. La variation de ce coefficient en fonction des déformations latérales est montrée ci-contre figure.2-1. On peut remarquer que la déformation latérale nécessaire à la mobilisation de la poussée passive est beaucoup plus grande

(2 à 4 % pour les sables denses, de 10 à 15 % pour les sables lâches) que la déformation nécessaire à la mobilisation de la pression active (de l'ordre de 0,25 et 1 % respectivement). Le coefficient **K₀** peut être déterminé expérimentalement par un essai triaxial pendant lequel on empêche toute déformation latérale. D'autres parts, on peut trouver des relations analytiques donnant **K₀** en fonction des propriétés du sol.

A titre d'exemple, Jaky propose la relation (1944): $K_0 = 1 - \sin \phi'$

Mayne et Kulhawy proposent l'expression suivante pour les sols sur consolidés en phase d'expansion seulement: $K_0 = (1 - \sin \phi')^{rsc \sin \phi'}$

L'expression la mieux adaptée au sable de Fontainebleau est celle de Meyerhof [1976]

$$K_{0(sc)} = (1 - \sin \phi) \sqrt{\frac{\sigma_A}{\sigma_M}}$$

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_M} = \frac{\sigma_A}{\sigma_M}$$

Selon les points A et M de la figure 2-2

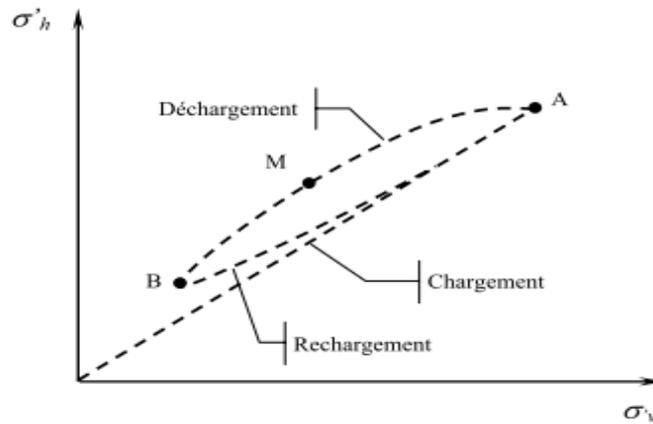


Figure 2-2- Evolution du coefficient K0 lors d'un cycle chargement, déchargement, rechargement

Les mesures réalisées en centrifugeuse [Gaudin, 1999] ont également montré que le coefficient K_0 pouvait être déterminé à partir de l'indice de densité du sol I_d selon l'expression suivante

$$K_0 = -\frac{1}{2,9} I_d + 0.63$$

La valeur de K_0 peut également être obtenue sur la base de la théorie élastique. Si un échantillon cylindrique de sol est sollicité par la contrainte vertical σ_v , et l'effort horizontal σ_h la déformation latérale ε_l peut être exprimé :

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E} [\sigma_h - \mu(\sigma_h + \sigma_v)]$$

Où E : Module de Young, μ : Coefficient de Poisson

Pour que cette déformation latérale soit nulle (matériau au repos) il faut que le rapport

$$\frac{1}{E} [\sigma_h - \mu(\sigma_h + \sigma_v)] = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\mu}{1-\mu}$$

Et

$$\sigma_h = \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right) \sigma_v = K_0 \sigma_v = K_0 \gamma z \qquad \frac{\mu}{1-\mu} = K_0, \quad \sigma_v = \gamma z$$

2-1-1-2 Etat de poussée du sol (Pression active de la terre) :

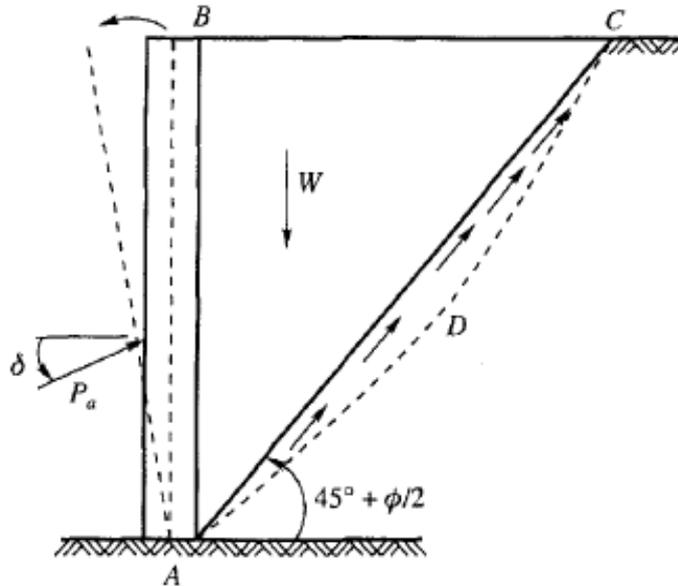


Figure 2-3- Pression active de la terre

Le soutènement s'oppose au mouvement du massif de sol. Dans ce cas, le massif exerce sur chaque élément de surface de l'ouvrage une action appelée pression active ou poussée. Les études expérimentales, montrent que cette pression active est fonction de la densité, de l'angle de frottement interne, de la cohésion, du coefficient de frottement du massif de sol sur le mur, de la rigidité de l'ouvrage de soutènement et du mode de son déplacement possible, de la forme de la surface libre du massif et de l'inclinaison de l'écran sur la vertical. Pour que la pression des terres sur le soutènement coïncide avec le niveau de la poussée, il est nécessaire qu'un certain déplacement puisse se produire. Le tableau 2-1 donne les déplacements nécessaires pour le développement de la poussée dans les sables et les argiles. Lorsque la poussée minimale s'établit, une partie du massif se déplace légèrement et se sépare des restes par une faible bande

Types de sol	Déplacement du mur
Sables	0.001H à 0.004H
Argiles	0.01H 0 0.04H

Tableau 2-1- Déplacement du mur nécessaire pour une poussée

2-1-1-3 Etat de butée du sol (Pression passive de la terre) :

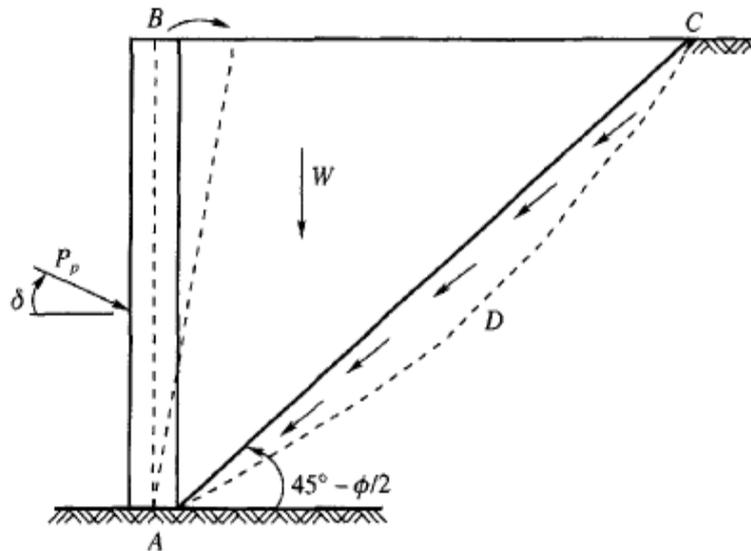


Figure 2-4- Pression passive (butée) de la terre

Le soutènement exerce un effort sur le massif, dans ce cas, le massif oppose sur chaque élément de surface de l'ouvrage une pression passive ou butée.

Des déplacements importants de l'ordre de 1 à 1/3 de la hauteur du mur selon la nature et la compacité des sols sont indispensables pour mobiliser la résistance maximale, bien supérieure à celui qui conduit à la poussée minimale. Le tableau 2-2 donne les déplacements nécessaires pour produire une butée. La butée maximale dépend des mêmes paramètres que la poussée. La ligne de rupture par cisaillement délimite une zone de massif en mouvement beaucoup plus importante que la poussée.

La poussée et la butée correspondent à deux états extrêmes d'équilibre de rupture du massif d'un sol.

Types de sol	Déplacement du mur
Sable dense	0.005H
Sable meuble	0.01H
Argile tendre	0.01H
Argile molle	0.05H

Tableau 2-2- Déplacement du mur nécessaire pour une pression passive

2-1-2 Equilibres de poussée et de butée :

Pour qu'il y ait équilibre de poussée ou de butée, il faut qu'il y ait déplacements figure.2-5 grossièrement de l'ordre de $(H/1000)$ pour mobiliser la poussée et supérieur à $(H/100)$ pour mobiliser la butée.

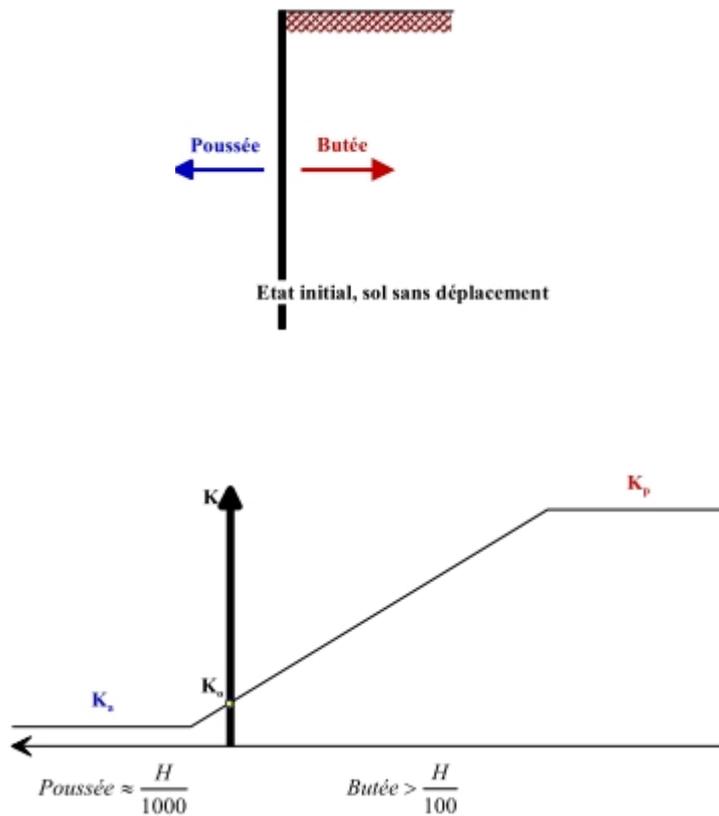


Figure 2-5- Déplacements nécessaires à la mobilisation des états limites de poussée et butée

2-1-2-1 Equilibre de poussée :

Le sol pousse sur l'écran et le met en poussée. Le sol se déplacera jusqu'à ce que la Contrainte effective horizontale initiale σ'_{h0} diminue, le sol se décomprime, pour atteindre une valeur limite σ'_a (équilibre actif ou inférieur) inférieure à σ'_{h0} . Par rapport à l'état initial, la contrainte σ'_{v0} étant constante, la contrainte horizontale σ'_{h0} diminue jusqu'à ce que le cercle de Mohr devienne tangent à la droite de Mohr-Coulomb pour une valeur de $\sigma'_h = \sigma'_a$ figure.2-6. Le sol est à l'état de poussée ; la contrainte de poussée est liée à la contrainte verticale σ'_{v0} , dans le cas d'un écran vertical sans frottement sol-écran, par le coefficient de poussée K_a (a comme actif).

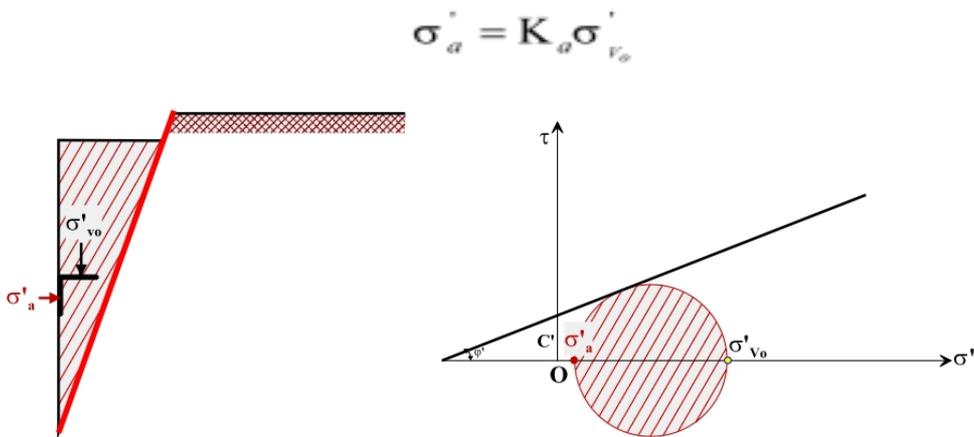


Figure 2-6- Etat limite de poussée du sol (sans talus $\beta = 0$, et sans frottement sol-écran $\delta = 0$)

2-1-2-2 Equilibre de butée :

L'écran pousse sur le sol et le met en butée. Le sol se déplacera jusqu'à ce que la contrainte horizontale initiale σ'_{h0} augmente, le sol se comprime, pour atteindre une valeur limite σ'_p (équilibre passif ou supérieur) supérieure à σ'_{h0} . Par rapport à l'état initial, la contrainte σ'_{v0} étant constante, la contrainte horizontale σ'_{h0} augmente jusqu'à ce que le cercle de Mohr devienne tangent à la droite de Mohr-Coulomb pour une valeur de $\sigma'_h = \sigma'_p$ figure.2-7. Le sol est à l'état de butée la contrainte de butée est liée à la contrainte verticale σ'_{v0} , dans le cas d'un écran vertical sans frottement sol-écran, par le coefficient de butée K_p (p comme passif).

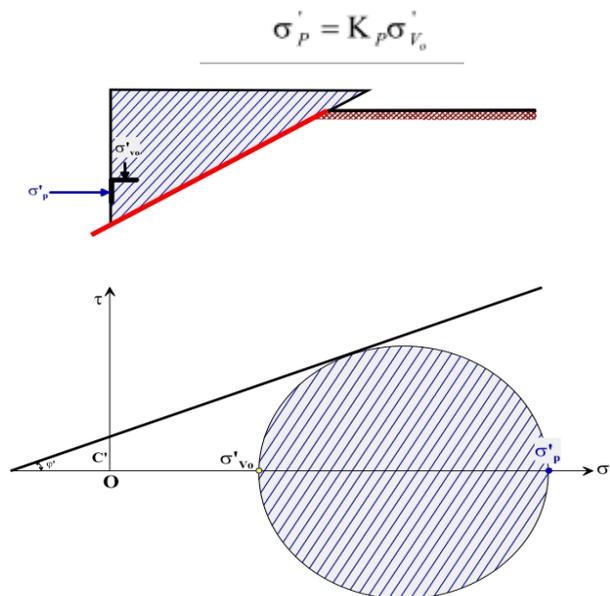


Figure 2-7 : Etat limite de butée du sol (sans talus $\beta = 0$, et sans frottement sol-écran $\delta = 0$)

2-1-3 Facteurs intervenant dans la distribution de la pression des terres :

Les études de différents auteurs (Rowe (1952-55), Blum (1931), Terzaghi (1953)) montrent que les facteurs intervenant dans la distribution de la pression des terres sur l'écran sont :

1. La densité du massif, nature du sol et sa stratification.
2. L'angle de frottement interne du sol.
3. La cohésion C .
4. Angle de frottement sol-écran δ .
5. La flexibilité de l'écran.
6. L'inclinaison de l'écran.
7. Le mode de son déplacement et de sa déformation possible.
8. La rigidité de système d'étais.
9. L'histoire des contraintes subies par le sol.
10. L'intensité de la surcharge.
11. Les conditions aux limites.
12. Les conditions cinématiques.

2-1-4 Choix de l'angle de frottement sol-écran δ :

L'angle de frottement δ entre le sol et le parement arrière du mur dépend des facteurs suivants :

- La rugosité du parement.
- L'angle de frottement interne du sol φ .
- Le tassement relatif entre le mur et le sol.
- L'inclinaison de la surface.

En première approximation on peut déterminer cet angle de frottement en fonction de l'état de surface du parement, comme il est indiqué dans le tableau 2-3.

Lorsque l'ouvrage de soutènement a tendance à tasser plus que le sol retenu, ce qui est le cas, par exemple, d'un mur plaqué contre un talus de déblai, l'angle δ est alors négatif. Le tassement relatif entre le sol et le mur joue ainsi un rôle important.

Dans tous les cas courants de murs rugueux en béton ou en maçonnerie, la valeur de $2/3 \varphi$ est celle à retenir.

Angle de l'interface en fonction de l'état de surface du parement	
	Angle de frottement sol-mur
Let de surface du parement	
Surfaces très lisses ou lubrifiées	$\delta = 0$
Surface peu rugueuse (béton lisse, béton traité Surface	$\delta = 1/3 \varphi$
rugueuse (béton, béton projeté , maçonnerie , acier..	$\delta = 2/3 \varphi$
Murs caissons	$\delta \geq 2/3 \varphi$
Parements fictifs inclinés des murs cantilevers	$\delta = \varphi$

Tableau 2-3- Angle du frottement sol mur en fonction de l'état de surface du parementure

2-1-5 Influence du frottement :

Si on prend en compte le frottement du mur avec le sol , on observe une inclinaison des efforts de poussée et de butée figure 2-8.

Soit δ l'angle de frottement du mur avec le sol :

- En poussée, le sol a tendance à « descendre » : la force est inclinée vers le bas et
 $\sigma_h = K_a \sigma_v \cos \delta_a$
- En butée au contraire, le sol est poussé vers le haut : la force est inclinée vers le haut et
 $\sigma_h = K_p \sigma_v \cos \delta_p$

Il en résulte une inclinaison dans les directions opposées :

- Lors de la projection des efforts pour écrire l'équilibre en moment, l'angle étant le même en poussée et en butée, un facteur en $\cos \delta$ affectent les poussées des terres mais pas pour le tirant ou la contrebutée.
- Pour l'écriture de l'équilibre en force, seuls les coefficients de poussée et de butée sont affectés par l'angle, les résultantes demeurent horizontales : les valeurs sont donc également modifiées.
- Par conséquent les efforts tranchants dans la paroi et donc les moments fléchissant sont également affectés.

En pratique, on prend souvent l'hypothèse $\delta_a = 0$ et $\delta_p = -\varphi/2$. Ceci n'affecte que peu les efforts structurels observés : empiriquement, l'influence du frottement du rideau se révèle donc faible,

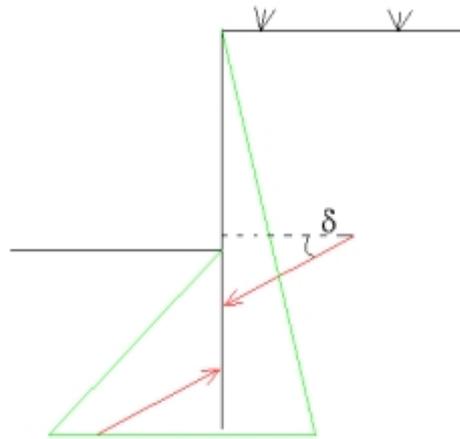


Figure 2-8 : Cas du mur avec frottement

2-1-6 Le cas particulier des écrans souples :

La caractérisation de la souplesse d'une paroi reste difficile. Le taux de déformation définissant les écrans flexibles varie en effet selon les auteurs de 5% de la hauteur totale pour Packshaw [1948] à 0,26% pour Bros [1972]. Malgré cela, la répartition triangulaire classique des forces de pressions a rapidement été mise à défaut dans le cas des ouvrages dont la déformation entre appuis paraissait importante. A partir d'analyses empiriques sur le dimensionnement des palplanches en bois, l'ingénieur danois Christiani (début XX^e siècle) a évoqué l'hypothèse d'une redistribution des pressions de poussée des zones situées entre appuis (qui subissaient un important déplacement) vers les zones situées au niveau des appuis (dont les déplacements restaient faibles).

Cette redistribution a été observée expérimentalement par Stroyer en 1935 et attribuée par Terzaghi [1943] à un effet de voûte conduisant à un report des pressions de poussée, par la mobilisation du cisaillement au sein du sol, des zones les moins rigides (entre appuis) vers les zones les plus rigides (sur appuis). La poussée résultante reste néanmoins inchangée.

Cet effet de voûte a par la suite été caractérisé plus précisément en fonction des spécificités de l'ouvrage et du type d'appuis [Delattre, 1999]. Les méthodes permettant de le prendre en compte dans le dimensionnement des ouvrages n'en restent pas moins très empiriques et sont peu appliquées dans la pratique. Citons pour mémoire celle de Terzaghi et Peck [1967] qui donne une estimation de la répartition des efforts sur les appuis, sans toutefois préciser la répartition des pressions de poussée sur l'écran.

Dans le cas des écrans souples autostables (sans appui), aucune théorie ou observation expérimentale ne fait allusion à un quelconque effet de voûte. Notons simplement que plusieurs travaux, notamment ceux de Rowe [1952], Terzaghi [1953] et Tschebotarioff [1944] ont montré que la répartition des pressions dépendait de nombreux paramètres (caractéristiques du sol, géométrie de l'écran, éventuelles surcharges) mais surtout de la cinématique de l'ouvrage, c'est à dire de la façon dont il se déplace. Dans le cas des écrans autostables dont la souplesse peut modifier la cinématique, la répartition des pressions peut être modifiée.

2- 2 Dimensionnement d'écran de soutènement :

Le dimensionnement des écrans de soutènement pour résister à la poussée des terres qu'ils doivent retenir est un problème classique de l'ingénierie civile et militaire qui a intéressé de nombreux scientifiques dès le début du XVIII^e siècle. Une discussion des premiers travaux sur ce sujet (dont Bullet 1691, Gautier 1717, Couplet 1726 et 1727, Bélidor 1729, Gadroy 1746, Rondelet, 1767) est présentée par Heyman (Heyman 1972). Verdeyen donne également quelques repères historiques concernant le développement de la mécanique des sols, dans lequel les écrans de soutènement prennent une place importante (Verdeyen 1959). Les modèles de calcul cités par exemple par l'Eurocode 7-1 (2004) sont les modèles analytiques, semi-empiriques ou numériques. S'il n'existe pas de modèle de calcul fiable pour un état limite particulier, on peut aussi se servir d'essais de chargement ou de la méthode observationnelle. Le choix de la méthode reste alors assez libre.

Delattre (2001) distingue cinq familles de méthodes de calcul des écrans de soutènement

- 1- Les méthodes dites « classiques », faisant appel à des calculs analytiques de la poussée et de la butée des terres,
- 2- La méthode du coefficient de réaction, prenant en compte une certaine interaction sol-structure,
- 3- La méthode des éléments finis, développée à partir des années 1970,
- 4- Les méthodes empiriques et semi-empiriques, s'appuyant sur un référentiel qui tient compte du comportement observé des ouvrages,
- 5- Les méthodes de calcul de l'état limite ultime, fondées sur des théories de plasticité.

2-2-1 les méthodes dites « classiques » : faisant appel à des calculs analytiques de la poussée et de la butée des terres,

Plusieurs théories permettent de calculer les coefficients de poussée et de butée d'un sol pulvérulent ($C = 0$). On mentionne les principales par ordre chronologique.

2-2-1-1 Méthode de Coulomb :

Charles Augustin Coulomb (1736 - 1806) a été d'abord un ingénieur du génie militaire avant de devenir plus tard un physicien encore plus célèbre par ses mémoires sur l'électricité et le magnétisme entre 1785 et 1791. Son premier ouvrage important fut, en tant que « Lieutenant en Premier du Génie », la construction de 1764 à 1772 à la Martinique du fort Bourbon. A son retour en métropole en 1773 il publie à l'Académie des Sciences un important mémoire de mécanique appliquée intitulé : **Sur une application des règles de Maximis & Minimis à quelques Problèmes de Statique, relatifs à l'Architecture. (Par M. Coulomb, Ingénieur du Roi).**

Ce mémoire est destiné à déterminer, autant que le mélange du Calcul et de la Physique peuvent le permettre, l'influence du frottement et de la cohésion, dans quelques problèmes de Statique. Après avoir expérimenté la résistance des piliers de maçonnerie en pierres, il étudie la pression des terres et des revêtements. Coulomb (1776) qui, le premier, a mis au point une méthode de calcul des murs de soutènement. A l'heure actuelle, la méthode de Coulomb est universellement employée, principalement aux Etats-Unis, en raison de sa simplicité théorique et pratique.

La théorie de Coulomb repose sur deux hypothèses :

- Le sol se rompt suivant une surface de rupture plane mais souligne bien figure 2-9
- La force agissant sur le mur a une direction connue. En d'autre terme cela signifie que l'angle de frottement δ entre l'écran et le mur est connu ; Ces deux hypothèses faites, la force agissante sur le mur est calculée par de simples considérations d'équilibre statiques à partir d'une règle d'extremum.

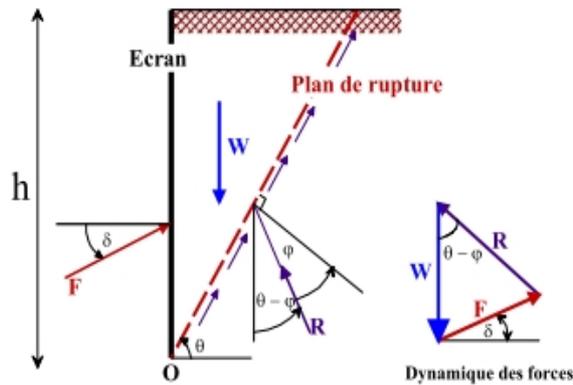


Figure 2-9 : Equilibre du coin de Coulomb

On suppose que la **surface de rupture** potentielle est un **plan (coin de Coulomb)** passant par le pied de l'écran et faisant un angle θ avec l'horizontale.

On fait l'hypothèse que la contrainte de cisaillement $\tau = \sigma' \text{tg } \varphi'$ est complètement mobilisée le long de ce plan. Le coin de Coulomb se comporte de façon rigide-plastique, ce qui n'est pas le cas généralement surtout si l'écran est de grande hauteur.

La réaction totale du sol R sur lequel glisse le coin de Coulomb est donc inclinée de l'angle φ sur la normale au plan de rupture.

En application de la méthode de Coulomb, on calcule la poussée en supposant que $\delta = 0^\circ$ Coulomb a défini les coefficients de pression de terre actifs et passifs respectivement par les expressions :

$$K_a = \left[\frac{\sin(\alpha - \varphi) / \sin \alpha}{\sqrt{[\sin(\alpha + \delta)] - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}}}} \right]^2 \quad 2-1$$

$$K_p = \left[\frac{\sin(\alpha + \varphi) / \sin \alpha}{\sqrt{[\sin(\alpha - \delta)] - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi + \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}}}} \right]^2 \quad 2-2$$

Où :

φ : Angle de frottement interne du sol.

δ : Angle de frottement sol – écran.

α : Inclinaison du mur avec l'horizontale. β : inclinaison de la surface du sol avec l'horizontale.

Dans les problèmes passives si $\delta > \varphi/3$, la courbure de la surface de rupture derrière le mur doit être tenue en compte, d'où l'équation (2.2) mène à une surestimation de la pression de terre. Très vite ce mode de calcul est mis en défaut tant sur le plan expérimental que sur le plan théorique, dans la validité des suppositions de sa théorie Coulomb n'a payé aucune attention du tout au mode de mouvement du mur et ça supposé que la distribution de pression latéral de la terre ait été simplement hydrostatique, il avait restreint l'application des règles de « Maximis et Minimis » dans le cas de la poussée à des familles de surfaces de ruptures planes.

La discussion de cette hypothèse fondamentale à la fin du 19ième siècle, a été acceptable pour l'étude de la majorité des problèmes de poussée posés par l'ingénieur. Elle reste encore largement acceptée un siècle plus tard.

En revanche, l'hypothèse de planéité des surfaces de rupture est remise en cause pour l'étude de la butée, il est ainsi montré que l'adoption des lignes brisées, d'arcs de cercles, d'arcs spirales logarithmiques, de combinaisons de surfaces planes et d'arcs de cercles, pour la modélisation de surfaces de rupture, permet d'obtenir des « Minimis » de la valeur de résistance en butée inférieure à ceux données par des surfaces planes.

2-2-1-2 Méthode de Rankine :

En plus des hypothèses suivantes :

- Sol semi-infini, homogène, isotrope,
- Condition de déformation plane,
- Courbe intrinsèque de Mohr-Coulomb
- Massif à surface libre plane,

Rankine (1857) avait rajouté l'hypothèse que la **présence d'un écran ne modifie pas la répartition des contraintes dans le massif.**

• Cas général :

Avec cette hypothèse, on peut déterminer la répartition des contraintes de poussée (ou de butée) le long d'un plan OD, dans le cas d'un sol **pesant pulvérulent** (γ, φ) **non surchargé.**

• Cas particuliers :

La méthode de Rankine peut prendre en compte des surcharges uniformes réparties sur toute la surface du sol. Cependant, il est impossible de réaliser un calcul littéral dans trois cas simples représentés sur la figure 2-10.

Pour ces situations, la solution communément adoptée consiste à calculer les contraintes appliquées au mur en l'absence de surcharge et à y superposer les efforts dus à la seule surcharge et calculés par la formule élastique de Boussinesq. Cette approche n'est pas pleinement satisfaisante, le principe de superposition ne pouvant être appliqué en toute rigueur. Une alternative pouvant être trouvée dans la résolution numérique du problème, avec un algorithme d'éléments finis par exemple.

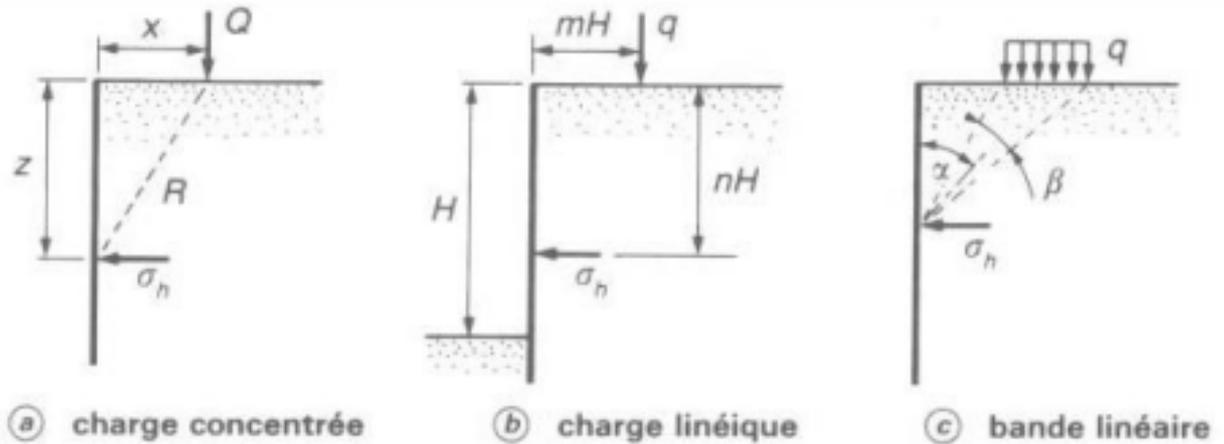


Figure 2-10- Calcul élastique des contraintes horizontales apportées sur un écran par des surcharges (d'ap. Schlosser)

Les surcharges correspondant à ces 3 cas sont données par les formules suivantes :

- a : $\sigma_h = \frac{3}{2} \frac{Q}{\pi} x^2 \frac{z}{R^5}$
- b : $\sigma_h = 1,27 \frac{q}{H} \frac{m^2 n}{(m^2 + n^2)^2}$ si $m > 0,4$ et $\sigma_h = 0,203 \frac{q}{H} \frac{m}{(0,16 + n^2)^2}$ si $m < 0,4$
- c : $\sigma_h = \frac{2}{\pi} q [(\beta + \sin \beta) \sin^2 \alpha + (\beta - \sin \beta) \cos^2 \alpha]$

2-2-1-3 Méthode de Boussinesq :

Boussinesq (1882) a amélioré la théorie de Rankine en prenant l'interaction réelle entre le sol et l'écran, c'est-à-dire en choisissant la valeur de l'angle de frottement δ sol-écran. Dans cet équilibre, Boussinesq considère une première zone où on a l'équilibre de Rankine se raccordant à une seconde zone où il tient compte des conditions aux limites sur l'écran figure 2-11

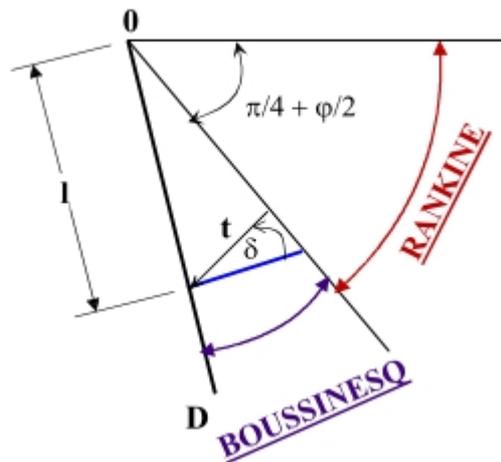


FIGURE 2-11- Equilibres de Boussinesq et de Rankine.

Boussinesq garde les résultats de Rankine concernant la répartition des contraintes sur l'écran :

- L'obliquité des contraintes est constante le long de l'écran OD, elle est choisie et fixée à δ
- La répartition des contraintes sur l'écran est triangulaire :

$$t_a = K_a \times \gamma \times \ell$$

Si **Boussinesq** avait bien posé le problème, il n'a été résolu qu'en 1948 par Caquot et Kerisel qui en ont donné la démonstration suivante.

On travaillera en coordonnées polaires, pour lesquelles les équations d'équilibre

$\text{divt} + F = 0$ s'écrivent :

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{r \partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \gamma \cos \theta$$

$$\frac{\partial \tau_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\theta}{r \partial \theta} + 2 \frac{\tau}{r} = -\gamma \sin \theta$$

σ_r : Contrainte normale radiale

σ_θ : Contrainte normale orthoradiale

τ : Contrainte de cisaillement

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} + 3\tau = -\gamma r \sin \theta$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \theta} + 2(\sigma_r - \sigma_{\theta}) = -\gamma r \cos \theta$$

avec $\sigma_{\theta} = k \sigma_r$

Le système des deux équations différentielles a été intégré par Caquot et Kérisel, les calculs étant améliorés par ABSI pour donner des tables complètes de poussée et butée fournissant les coefficients K_a et K_p . Le problème est déterminé par les conditions aux frontières :

- surface libre : contraintes nulles
- sur l'écran : obliquité imposée δ de la contrainte.

Entre la surface libre et la première ligne de glissement on a un équilibre de Rankine et entre la première ligne de glissement et l'écran un équilibre de Boussinesq.

Le tracé des lignes de glissement montre que les lignes de glissement diffèrent peu de lignes droites dans le cas d'équilibre de poussée, par contre elles s'en éloignent fortement dans le cas d'équilibre de butée.

2-2-1-4 Terzaghi (1936) :

Cette ambiguïté est à la base d'une critique sévère du travail de Rankine par Terzaghi en 1936. Selon lui, le fait d'admettre qu'un déplacement négligeable suffise à atteindre un état de rupture actif ou passif (comportement rigide-plastique du sol) va contre toutes les observations in situ qui mettent en évidence la présence d'un état intermédiaire, appelé état au repos. D'après lui, des déformations qui dépendent des propriétés élastiques du sol sont nécessaires pour atteindre les états de rupture.

En particulier, les déformations nécessaires pour atteindre un état passif ne sont pas envisageables dans les conditions réelles.

Dans sa prise de position, Terzaghi critique également la théorie de Coulomb. Il dénonce surtout la généralisation de son utilisation, au même titre que l'utilisation de la théorie de Rankine, pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement, sans distinction du type de structure. Meem avait déjà mis en cause l'application de ces théories aux parois de fouilles étayées, car les efforts mesurés in situ dans les étais ne coïncidaient pas avec les valeurs prévues par le calcul (Meem 1908).

Selon Terzaghi, les hypothèses à la base de la théorie de Coulomb ne sont que rarement

valables dans les cas pratiques. Le fait d'admettre une surface de rupture plane est une limitation, mais c'est principalement l'hypothèse sur la distribution des poussées le long du mur, admise arbitrairement triangulaire, qui est discutée. Elle dépend selon lui du mode de déplacement du mur (rotation ou translation) et de ses conditions d'appuis (mur de soutènement ou paroi de fouille étayée). Cet article de Terzaghi est surtout intéressant au niveau de sa perception de l'interaction sol-structure qui est beaucoup plus avancée et précise que chez Coulomb ou Rankine. La figure 2-12, tirée de ce document, résume les progrès réalisés par Terzaghi à ce sujet. Elle présente l'évolution de l'intensité et de la position de la résultante de la poussée des terres agissant contre un mur de soutènement, premièrement lorsque le mur est en rotation par rapport à sa base, et deuxièmement lorsque le mur se déplace par translation.

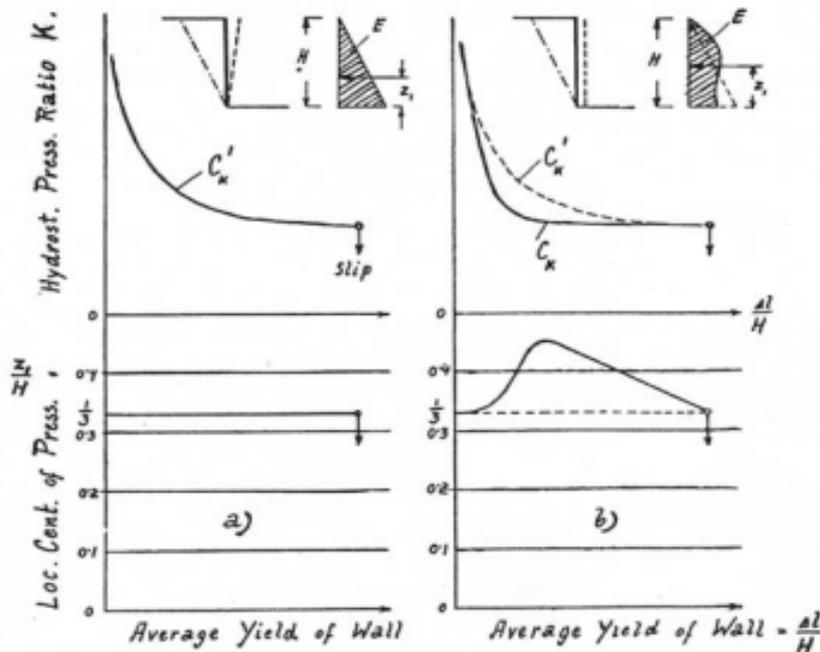


Figure 2-12- Coefficient de poussée latérale des terres contre un mur vertical et position du point d'application de la résultante (selon Terzaghi 1936a). Distinction du mode de déplacement du mur

Selon lui, la poussée des terres dépend de l'intensité et du mode de déplacement du mur de soutènement. Lorsque le mur se déplace, la poussée diminue depuis la poussée au repos pour atteindre progressivement un plateau. La courbe exprimant l'intensité de la poussée en fonction du déplacement varie selon le mode de déplacement admis pour le mur mais la valeur finale est identique pour les deux modes et correspond à la poussée active de Rankine. Ce dernier résultat peut être montré dans le cas d'un mur parfaitement lisse par la

théorie de la plasticité. La position de la résultante varie également en fonction du mode de déplacement.

Terzaghi introduit donc deux notions nouvelles, représentées sur la figure 2-13. Premièrement, la réponse du sol ne peut pas être décrite seulement par les deux états de rupture active et passive. La poussée des terres varie entre ces deux valeurs en fonction du déplacement du mur. Il mentionne aussi que l'état actif est obtenu pour des déplacements relativement faibles alors que l'état passif nécessite des déplacements importants. Deuxièmement, le mode de déplacement du mur a une influence sur l'intensité et la distribution des poussées. A ce sujet, il évoque aussi qu'il existe une différence entre un mur de soutènement en maçonnerie rigide et une paroi étayée souple. La rigidité du sol et les conditions d'appui de la structure ont une influence sur les poussées des terres contre la structure.

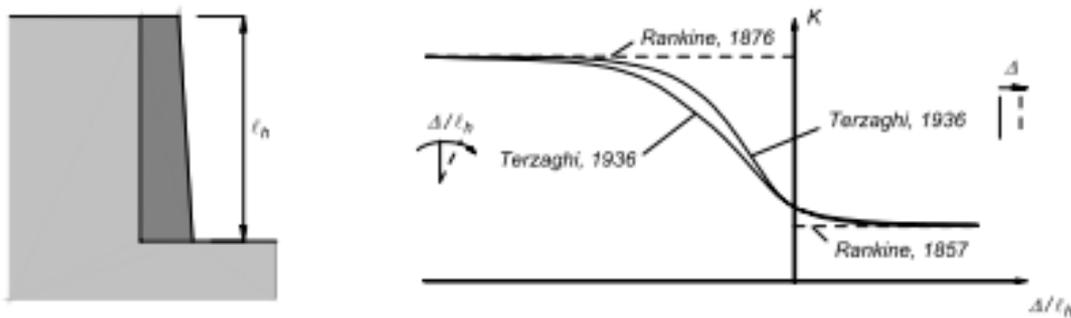


Figure 2-13- Progrès réalisés par Rankine et Terzaghi dans la perception de l'interaction sol-structure

Terzaghi écrira ensuite un certain nombre d'ouvrages de référence (dont Terzaghi 1951 et Terzaghi et al. 1996, 1ère édition 1948), dans lesquels il applique ces principes pour évaluer les pressions des terres sur différents types de soutènement.

Lors de l'application de différentes théories à des cas pratiques (dont celles de Coulomb et de Rankine), il insiste sur le fait que les hypothèses doivent être justifiées et vérifiées, particulièrement celles concernant les propriétés du sol, la rugosité de la structure et l'état de déformation admis dans le sol (plastique ou non). Cela le conduit à proposer des approches différentes suivant le type de structure à dimensionner, en fonction de la rigidité et des conditions d'appui de la structure. Il distingue ainsi, entre autres, les murs de soutènement, les blindages de fouilles et les parois ancrées souples et rigides.

2-2-1-5 Méthodes de Krey et Blum :

Krey (rapporté par Bica et Clayton, [1989]) a établi les premières hypothèses sur la répartition des forces de pressions sur un écran encastré dans le sol et soumis à un effort en tête. Il considère notamment que, pour la partie en fiche, la partie supérieure mobilise la butée devant l'écran et la partie inférieure derrière l'écran

Figure 2.14a. La transition entre ces deux états est supposée linéaire. La hauteur en fiche est alors déterminée en écrivant l'équilibre en moments et en efforts de la paroi.

Ces hypothèses ont été reprises peu après par Blum [1931] qui suppose que la transition entre les états d'équilibre limite en fiche s'effectue selon une répartition plus nuancée

figure 2.14b, La pente du profil de pression au voisinage du point de rotation reste à déterminer, mais Blum montre que le dimensionnement de l'ouvrage dépend peu de la valeur de cette pente et que l'adoption d'un schéma simplifié figure 2.14c, qui simplifie la résolution mathématique du problème, est suffisant pour dimensionner l'ouvrage. Sur ce schéma simplifié, les pressions du sol au-dessous du centre de rotation sont assimilées à une force ponctuelle qui s'applique au niveau de ce dernier.

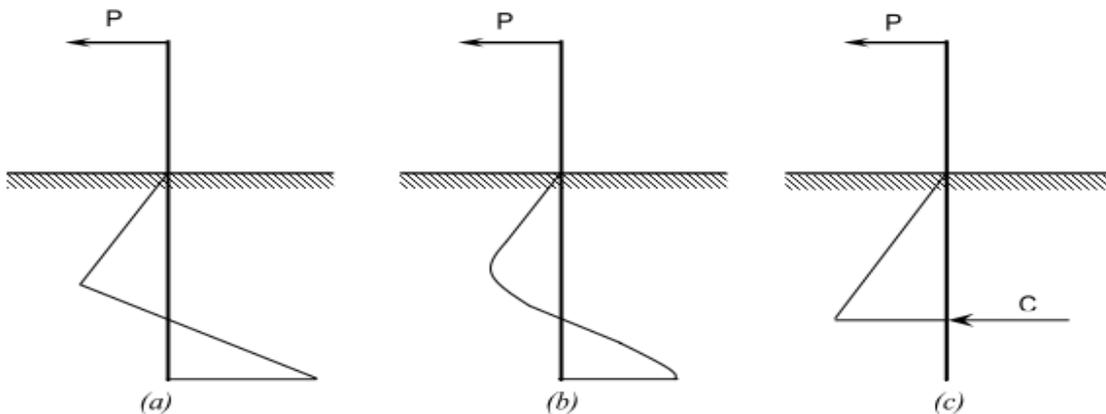


Figure 2-14- Schéma de calcul à l'équilibre limite adopté par Krey (a) et par Blum (b) et (c)

Une étude paramétrique menée par Blum montre que ce schéma simplifié conduit à une sous-estimation de la fiche d'environ 20%. L'extrapolation de ces résultats aux écrans de soutènement autostables, simplement encastrés, conduit Blum à préconiser le dimensionnement de l'ouvrage avec le diagramme simplifié en appliquant une majoration forfaitaire de 20% de la fiche ainsi calculée.

2-2-2 Méthode du coefficient de réaction : prenant en compte une certaine interaction sol-structure,

Dans la plupart des cas, les ouvrages en parois moulées dans le sol sont dimensionnés à partir de la méthode dite «aux coefficients de réaction» (également appelée parfois méthode «élastoplastique»).

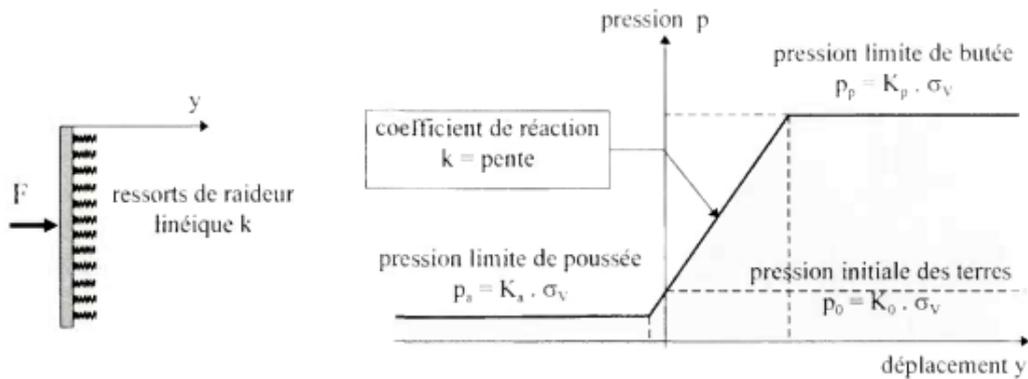


Figure 2-15- Modélisation du comportement du sol $p = k.y$

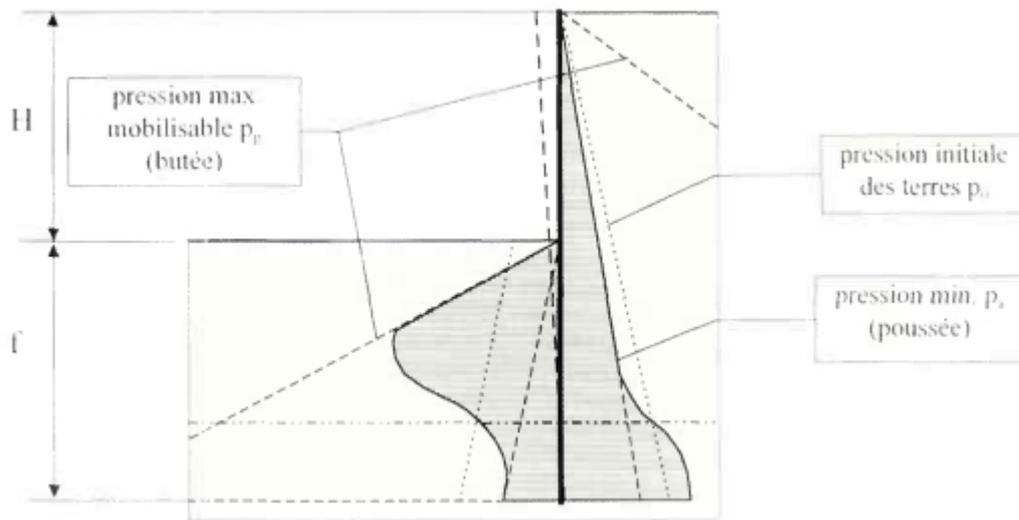


Figure 2-16- Schématisation du comportement de parois simplement encastées dans le sol

En France, la méthode du coefficient de réaction a été utilisée à partir des années 1970 et elle a été relativement vite intégrée dans des logiciels spécialisés (Delattre, 2001). Le succès de cette méthode, particulièrement en France, peut être expliqué entre autres pays. Les résultats de l'essai pressiométrique sont utilisés pour déterminer le coefficient de réaction horizontal du sol,

k_h . La méthode de calcul aux coefficients de réaction permet de déterminer les efforts et déformations dans un écran de soutènement fiché dans le sol, aux différentes phases des travaux et d'exploitation. La méthode repose sur une modélisation simplifiée de l'action du sol sur l'écran : cette action est réduite, en chaque point de l'écran, à gauche et à droite, à une pression horizontale, liée au déplacement du niveau considéré par une loi de réaction. Les lois de réaction utilisées, couramment mais abusivement désignées par le terme de « lois élastoplastiques », sont des lois de mobilisation linéaire avec paliers de poussée et de butée, dont le domaine pseudo-élastique est caractérisé par le coefficient de réaction k_h (Delattre et al. 2000). L'un des défauts de cette méthode est la difficulté de déterminer le coefficient de réaction, qui n'est pas un paramètre intrinsèque du sol mais dépend non seulement de la nature du sol mais aussi de la géométrie de l'écran et du système de support, entre autres. Des propositions pour sa détermination ont été faites par Balay (1984), Monnet (1994), Schmitt (1995, 1998) et Simon (1995) pour ne citer que les principaux contributeurs. Pour de plus amples renseignements sur cette méthode, ses conditions d'application et la détermination des paramètres de calcul, on pourra utilement se rapporter à la note d'information technique du LCPC de Juillet 1984 intitulée «Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction».

2-2-3 Méthode des éléments finis : développée à partir des années 1970,

La méthode des éléments finis est un outil très général qui permet de trouver une solution numérique à tout problème que l'on peut décrire à l'aide d'équations aux dérivées partielles sur un domaine fini. Différentes extensions permettent par ailleurs de prendre en compte des discontinuités spatiales ou temporelles des solutions recherchées, des domaines d'extension infinie, etc. Elle offre la possibilité

de prendre en compte des modèles de comportement très sophistiqués, plus réalistes que ceux pris en compte par des méthodes plus traditionnelles, et il est donc naturel qu'elle ait suscité un grand intérêt de la part des ingénieurs de la géotechnique et du génie civil. Ainsi, après des premières applications aux barrages

[Clough et Woodward, 1967], aux excavations

[Chang et Duncan, 1970] et aux murs de soutènement [Duncan et Clough, 1971 ; Clough et Duncan, 1971], l'utilisation de la méthode des éléments finis pour le calcul des écrans de soutènement a débuté dans les années 1970 [Bjerrum et al. 1972 ; Egger, 1972 ; Clough et al. 1972 ;

Palmer et Kenney, 1972]. Ces premières analyses ont été suivies d'efforts importants pour examiner de manière systématique les apports potentiels de la méthode des éléments finis au calcul des ouvrages géotechniques en général et des ouvrages de soutènement en particulier [Duncan, 1994 ; Gens, 1995]. la mise en œuvre de la méthode et ont limité son emploi.

Les méthodes de calcul traditionnelles présentent en effet l'inconvénient majeur de ne traiter valablement que des formes d'ouvrages très particulières, pour lesquelles des solutions particulières ont été dégagées [Delattre, 2002 ; Delattre et Marten, 2003]. Ainsi, pour ne citer que les limites d'emploi les plus évidentes

- La géométrie du terrain ne peut être prise en compte de façon rigoureuse que dans quelques configurations ; ainsi, les contraintes de poussée ou de butée du sol ne sont exprimées que pour les configurations d'ouvrages dans lesquelles le terrain naturel est limité par un plan, horizontal ou incliné, les interfaces entre couches du sol sont parallèles au terrain et l'ouvrage connaît une cinématique particulière ;

-Les interactions du soutènement avec d'autres composantes de l'ouvrage ne peuvent être prises en compte que par un torseur d'effort applicable au soutènement, ce qui ne permet pas de rendre compte des formes d'interaction complexes comme celles qui sont dues aux ouvrages avoisinants ;

la modélisation d'un soutènement au voisinage d'une fondation, d'un tunnel ou d'un autre soutènement reste ainsi inaccessible aux méthodes traditionnelles. De la même façon, l'interaction du soutènement avec d'autres composantes de l'ouvrage, comme des murs en retour, par exemple, reste toujours laborieuse ;

- La modélisation de l'interaction du sol avec la structure reste insuffisamment explicite et fait appel à des notions qui restent largement discutées, telles que le coefficient de réaction.

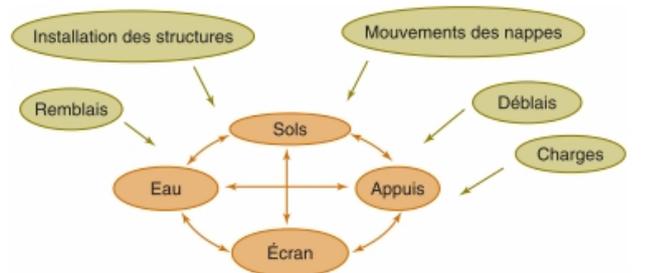
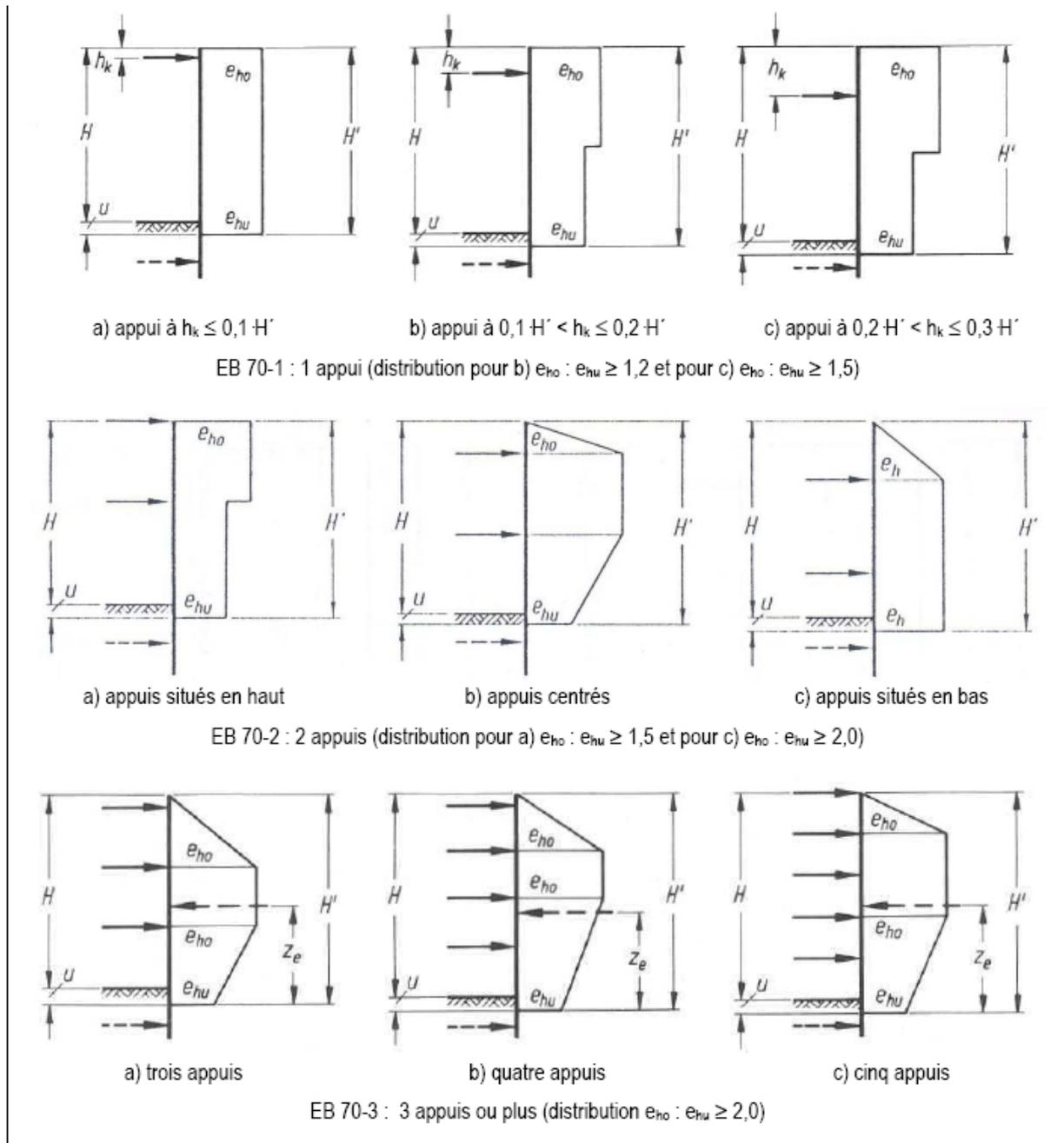


Figure 2-17- relations mises en jeu par la modélisation des écrans de soutènement

2-2-4 Méthodes empiriques et semi-empiriques : s'appuyant sur un référentiel qui tient compte du comportement observé des ouvrages,

En Allemagne, la méthode du coefficient de réaction est rarement appliquée dans l'ingénierie quotidienne. La méthode de calcul utilisée habituellement pour le dimensionnement des écrans de soutènement est de type semi-empirique. La poussée est calculée analytiquement d'après la norme DIN 4085 (1987), qui s'appuie sur les règles classiques de Coulomb et Rankine. S'il est probable que les mouvements du soutènement attendus n'atteindront pas les mouvements nécessaires pour activer l'état limite de la poussée (paroi rigide, tirants pré-contraints), la norme DIN se réfère aux recommandations de l'EAB4 (1994) et demande la prise en compte d'une « poussée majorée ». Dans un deuxième temps, la poussée est « redistribuée » selon le type de soutènement et les conditions d'appui. La figure 2.18 montre la redistribution de la poussée pour des écrans continus, c'est à dire des rideaux de palplanches, des parois moulées ou des parois de pieux forés (qui, contrairement aux parois berlinoises, forment tous un écran continu en fiche). Ces diagrammes ont été établis à l'aide de nombreuses données expérimentales, provenant à l'origine principalement de chantiers de métro. À côté de l'EAB, il existe d'autres recommandations nationales, par exemple l'EAU (1996) relatif aux ouvrages de rives, ainsi que des recommandations locales (par exemple les « Stadtbahn-Richtlinien » à Francfort-sur-le-Main). Une fois les sollicitations déterminées, les efforts dans l'écran sont calculés en considérant l'écran comme une poutre, appuyée d'une part sur la butée et d'autre part sur les appuis. Lors de ces calculs, il est possible de considérer la partie en fiche comme un système appuyé sur des ressorts, à l'instar de la méthode du coefficient de réaction



(Figure 2-18- Figures de redistribution pour des rideaux de palplanches et des parois en béton coulé en place données par les règles EAB (3ème édition, 1994).

Les notions signifient : e_h = poussée horizontale, « e » étant la notation pour « Erddruck »

en allemand e_{ho} , e_{hu} = poussées maximale et minimale, « o » = oben (haut) et « u » = unten (bas) H = profondeur de la fouille H' = hauteur de la poussée effective jusqu'au point d'intersection obtenu par la différence « poussée moins butée effective » u = partie de H' en dessous du fond de la fouille h_k = niveau de l'appui z_e = point d'application de la force résultante de la poussée

La flèche pointillée en fiche symbolise la résultante de la butée effective.

2-2-5 Méthodes de calcul de l'état limite ultime : fondées sur des théories de plasticité.

Plusieurs méthodes permettent de calculer les écrans de soutènements à l'état limite ultime

- Où le rideau est ancré en tête et simplement buté en pied
- Où le rideau n'est pas ancré en tête, mais résiste uniquement par un bon encastrement dans le sol de fondation.
- Travaux de Brinch Hansen (1953)

2-2-5-1 Rideau ancré, simplement buté en pied (BUTEE SIMPLE) :

La plus immédiate des méthodes de calcul des écrans de soutènement, et probablement la première pour le dimensionnement des écrans de soutènement, tels les rideaux de palplanches, s'est inspirée de la théorie des murs de soutènement rigides.

Hypothèses

Dans cette approche,

- Le rideau ou écran de soutènement est supposé rigide ;
- Il est soumis aux forces de poussée et butée de Rankine ;
- Le pied est libre de se déplacer, la tête tourne autour de l'ancrage.

Dans cette situation, le mécanisme de rupture est celui d'une rotation autour du point d'ancrage.

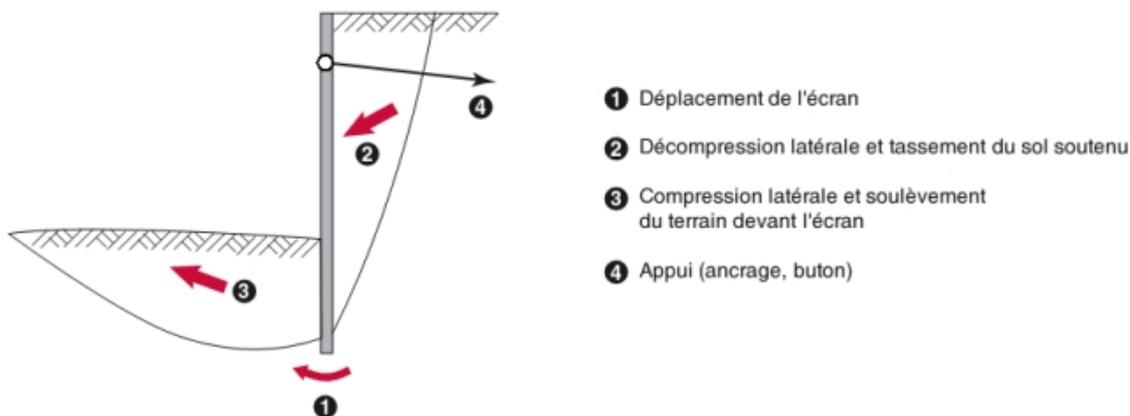


Figure 2-19- Mécanisme de rupture d'un écran simplement buté, d'après Delattre (2001)

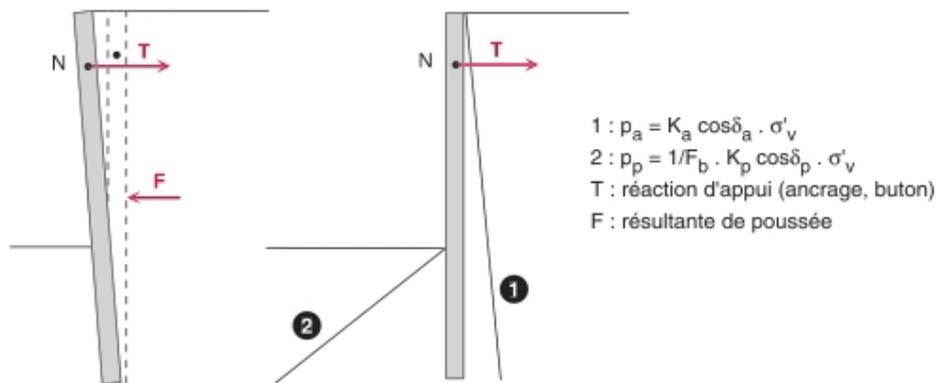


Figure 2-20 - Cinématique d'un écran rigide ancré et distribution résultante des pressions (Cas d'un terrain frottant homogène).

A la rupture, le mur est en rotation autour de l'ancrage (ou tirant), placé à proximité du haut du rideau. On peut donc considérer qu'il y a mobilisation complète des pressions des terres passives d'un côté du mur et actives de l'autre : on parle alors de rideau ancré et simplement buté en pied. La figure 2-19 montre la répartition de la pression des terres.

On notera qu'en pratique le tirant n'est pas tout en haut de la paroi, par conséquent, la partie de sol au dessus du tirant n'est pas en poussée. Cependant, Fourrie et Potts (1988) ont étudié numériquement l'influence de la position de l'ancrage et en ont conclu que l'hypothèse de mobilisation totale des pressions actives (ou poussée) des terres reste acceptable si le tirant est situé dans le tiers supérieur de l'excavation.

Le problème se résout en écrivant :

- l'équilibre horizontal en force : $T + F_p = F_a$
- la nullité du moment autour de l'ancrage : $F_a [2/3(H+d) - B] = F_p [2/3d + H - B]$

avec les résultantes de poussée des terres $F_a = K_a \gamma'(D+H)D/2$ et $F_p = K_p \gamma'D^2/2$

Le problème est statiquement déterminé : l'équation en moment est un polynôme de 3^e degré en D avec une seule racine réelle positive. L'équilibre horizontal des efforts permet ensuite le calcul de la force T à appliquer au tirant.

Cas de la présence d'eau :

Nous avons jusqu'ici supposé implicitement que le matériau était sec. Dans le cas où de l'eau est présente dans le massif, le calcul doit la prendre en compte.

La stabilité de l'ouvrage se calcule alors en incluant les efforts dus à l'eau et calculés séparément, comme indiqué sur la figure 2-21. S'il y a écoulement d'eau dans le massif, il faudra commencer par résoudre le problème hydraulique

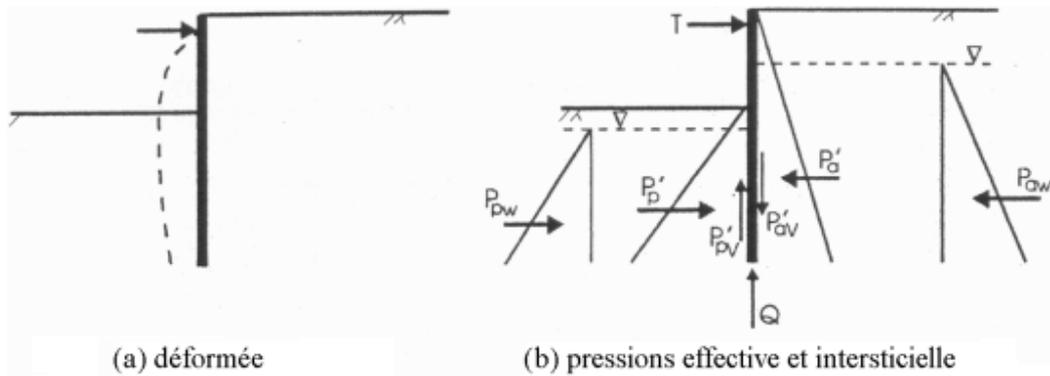


Figure 2-21- Cas de l'écran en présence d'eau (adapté de Potts)

2-2-5-2 Rideau non ancré en tête et encastré en pied :

Un rideau non ancré, battu dans un sol pulvérulent, subit une rotation autour d'un point O situé dans sa partie en fiche. La figure 2-22 montre les déplacements du rideau et les efforts normaux correspondants. Le calcul est fait par la méthode de Rankine, à partir des hypothèses simplificatrices suivantes (figure 2-23) :

- Le sol des deux côtés du rideau, au-dessus du point de rotation O, est en état d'équilibre limite ;
- Les efforts de contrebutée sont équivalents à une force horizontale F_c appliquée au niveau du centre de rotation O.

On prend généralement une hauteur de contrebutée égale à 20 % de la hauteur de butée z_0 . Cela réduit les inconnues du problème au nombre de deux :

- la hauteur de butée Z_0 ;
- la force de contrebutée F_c .

Elles peuvent alors être calculées par les équations de la statique traduisant l'équilibre du rideau. La valeur de Z_0 est déterminée en écrivant l'équilibre des moments autour du point O, ce qui donne une équation du troisième degré en Z_0 , analogue à celle donnant la valeur de la fiche D par la formule

$$2(K_p - K_a)D^3 + [3(H - a)K_p - 3(2H - a)K_a] D^2 - 6H(H - a) K_a D - H^2 (2H - 3a)K_a = 0$$

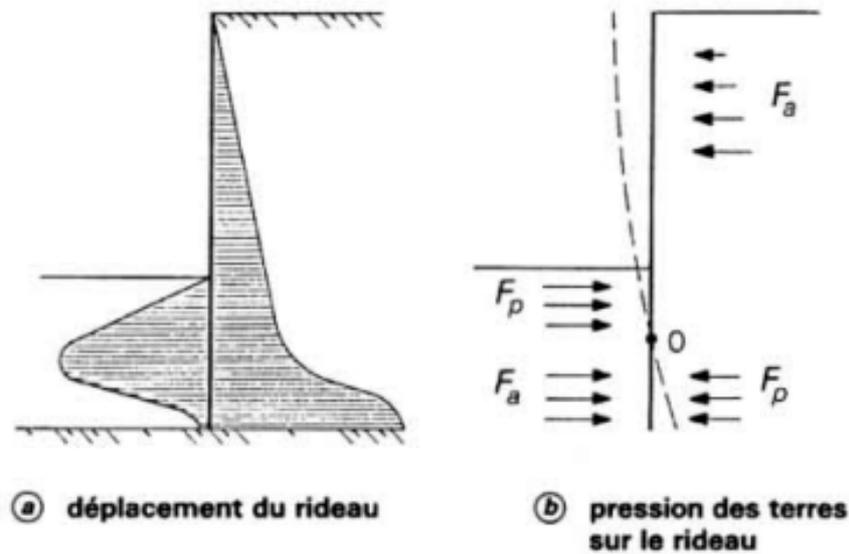


Figure 2-22– Calcul à l'état limite d'un rideau encastré, non ancré (sol pulvérulent)

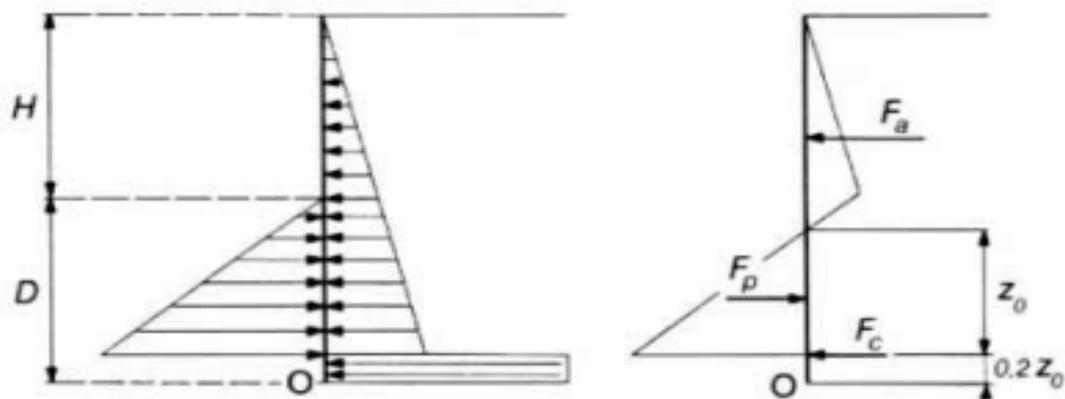


Figure 2-23 – Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré

La fiche du rideau a alors pour expression :

$$D = \frac{H}{K_p^2 - 1} + z_0 + 0,2z_0$$

La force de contre-butée F_c s'obtient en écrivant qu'en projection horizontale la résultante générale des forces s'exerçant sur le rideau est nulle, soit :

$$F_c = F_p - F_a$$

Pour tenir compte d'un coefficient de sécurité par rapport à l'équilibre limite ainsi calculé, on considère que la moitié de la butée est mobilisée, ce qui, dans les calculs, conduit à remplacer K_p par $1/2 K_p$. Il est alors possible de déterminer la valeur maximale du moment fléchissant dans le rideau à partir du diagramme des pressions de figure 2-23, et de choisir un type de palplanche d'inertie convenable.

2-2-5-3 Travaux de Brinch Hansen (1953) :

Jusqu'alors, la démarche adoptée pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement, qu'il basé sur des méthodes théoriques ou semi-empiriques, fait intervenir la structure dans une seconde étape après avoir estimé les pressions de contact auxquelles elle est soumise.

Celles-ci sont dans certains cas évaluées sur la base d'observations faites à l'état de service, lorsque les déplacements de la structure sont relativement faibles et que le sol est proche d'un état au repos. La vérification de la sécurité structurale du mur ou de la paroi de soutènement est donc effectuée sur la base d'hypothèses qui ne sont pas forcément vérifiées lors d'une rupture par défaillance interne de la structure. La cinématique avec laquelle sont déterminées les pressions de contact n'est en effet pas

forcément compatible avec les modes de rupture de la structure. Ceci est particulièrement le cas pour les parois étayées ou ancrées pour lesquelles différents modes de rupture peuvent être envisagés : rupture d'un étai ou d'un ancrage, rupture de la paroi par flexion ou par effort tranchant, rupture globale par glissement,... . La cinématique de rupture dans le sol et les pressions de contact diffèrent par conséquent selon le mode de rupture considéré.

Brinch Hansen propose en 1953 une méthode générale, systématique et innovante pour évaluer la poussée des terres contre des ouvrages de soutènement en tenant compte de la cinématique de rupture du système sol-structure (Brinch Hansen 1953).

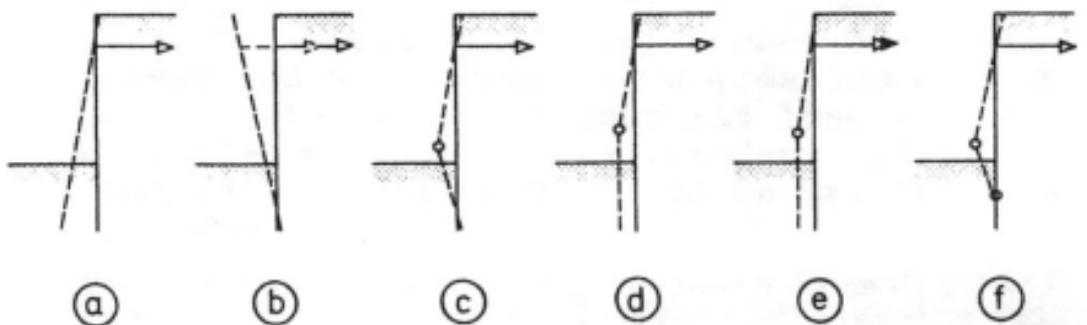


Figure 2-24- Modes de rupture possibles pour une paroi ancrée et fichée avec ou sans formation de rotules plastiques dans la structure (figure tirée de Steenfelt et al.1981)

Le calcul de l'intensité et de la distribution des pressions de contact contre une paroi de soutènement est effectué en fonction du mode de rupture admis pour la structure. Dans une première étape, la méthode consiste à construire un mécanisme de rupture dans le sol, appelé figure de rupture et composé de lignes de rupture, de surfaces ou zones de rupture et de zones élastiques, qui est compatible avec le mode de rupture de la structure. Par certaines simplifications, Brinch Hansen propose ensuite une démarche systématique, basée sur les conditions d'équilibre, pour déterminer les pressions de contact contre les différentes parties de la paroi. La figure 2-24, tirée d'un article faisant référence à la méthode de Brinch Hansen, présente différents modes de rupture possibles pour une paroi ancrée et fichée. Un fait intéressant est que selon Brinch Hansen, le mode de rupture peut être choisi lors d'un dimensionnement. Ceci est normalement vrai pour une solution statiquement admissible au sens de la théorie de la plasticité. La méthode de Brinch Hansen ne remplit cependant pas rigoureusement les conditions requises par cette théorie.

Brinch Hansen est le premier à intégrer directement le comportement de la structure à la ruine dans le calcul des poussées des terres. Il assure ainsi une compatibilité cinématique entre le sol et la structure à l'état limite ultime, ce qui conduit à une représentation plus réaliste du comportement du système sol-structure. L'interaction sol-structure joue donc un rôle prépondérant dans son approche.

Par contre, cette méthode qui se base sur des considérations à la rupture fait partie de la catégorie des méthodes d'équilibre limite. Elle ne renseigne pas sur les états intermédiaires et les déplacements nécessaires pour atteindre l'état de rupture admis ne peuvent pas être évalués.

2-3 Les méthodes actuelles :

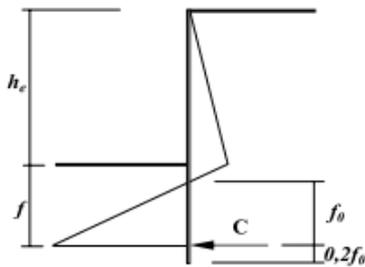
Les méthodes utilisées actuellement reposent toutes sur les hypothèses établies par Krey puis par Blum. Elles se sont par la suite différenciées selon la pratique et l'intérêt que les différents praticiens leur ont portées. Ainsi, si les méthodes françaises n'ont pas évolué depuis leur établissement, les méthodes anglo-saxonnes ont connu quelques développements, la théorie de l'équilibre limite restant très prisée par les géotechniciens de ces pays. Le présent paragraphe présente donc les deux méthodes françaises et les derniers développements des méthodes anglaises et américaines.

La première méthode française est celle rapportée par Josseaume [1974]. Elle suppose un diagramme des pressions réparties comme indiqué sur la figure 2-25a. La hauteur sur laquelle s'exercent les efforts de contrebutée est égale à 20 % de la hauteur de butée f_0 . Ces efforts de contrebutée sont ramenés à un effort ponctuel C appliqué au niveau du point de rotation O .

L'écriture des équations d'équilibres en forces et en moments selon ce schéma conduit à la résolution d'un système de deux équations où h_e et f_0 sont les inconnus. Ces mêmes équations conduisent à la détermination de l'effort de contrebutée C ainsi qu'au moment de flexion dans la paroi.

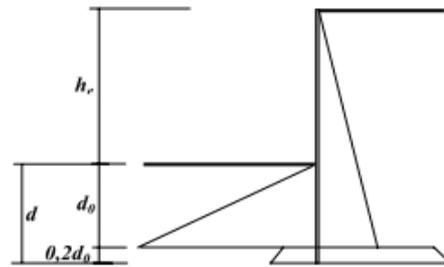
La seconde méthode française est l'œuvre de Houy [1976]. Elle repose sur le même schéma d'équilibre mécanique et consiste à déterminer la fiche et le moment maximal à partir d'abaques de dimensionnement fonctions respectivement de l'angle de frottement interne et du moment de flexion au niveau du fond de fouille. Ces deux méthodes conduisent sensiblement aux mêmes résultats.

(a) Méthodes françaises
(Jossaume, [1974] et Houy, [1976])



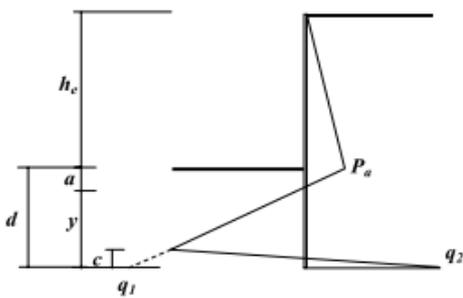
- h_e, f_0, C et M_f à partir des équations d'équilibre en force et en moments.

(b) Méthode anglaise
(Padfield and Mair, [1984])



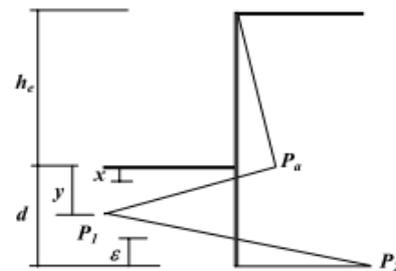
- h_e et d_0 à partir de l'équilibre en moments.
- Niveau du point de pression nulle et du point de moment maximal identique. Moment maximal à partir du moment de fond de fouille.

(c) Méthode américaine
(Bowles, [1988])



- h_e, a, y et c à partir des équations d'équilibre en force et en moments.

(d) Méthode de King
(King, [1995])



- ϵ à partir d'abaques.
- Ecriture des équations d'équilibre et des relations sur les triangles similaires.
- Moment maximal à partir du moment de fond de fouille.

Figure 2-25- Méthodes classiques de dimensionnement des parois autostables à l'équilibre limite

La méthode anglaise, rapportée par Padfield et Mair [1984], repose sur le diagramme de pressions présenté sur la figure 2-25b. Elle se différencie des méthodes françaises par la forme du diagramme de pressions et notamment par la prise en compte complète de la contrebutée. La condition d'équilibre limite est définie par la hauteur en fiche d juste nécessaire pour assurer l'équilibre de la paroi et par les coefficients K_a et K_p . La hauteur d'excavation limite h_l est alors définie par l'expression suivante :

$$\frac{h_l}{d} = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{K_p}{K_a}\right) - 1}{1,2}}$$

La méthode américaine repose sur l'hypothèse de base de Krey et considère une répartition linéaire des pressions comme indiquées sur la figure 2-25c. Le calcul repose sur la détermination de la hauteur en fiche d pour une hauteur libre h_e donnée. La résolution passe par la détermination de quatre inconnues : y , d , q_1 et q_2 . Deux équations sont issues de l'équilibre de la paroi. Les deux autres équations sont définies en faisant l'hypothèse que (i) la butée limite est pleinement mobilisée sous le fond de fouille (le gradient de la pente du diagramme est alors $\gamma(K_p - K_a)$) et (ii) la valeur de q_2 est supposée maximale et égale à la butée sur la hauteur totale de l'écran moins la poussée sur la partie en fiche.

La méthode de King est une adaptation de la méthode américaine générale. La butée n'est plus pleinement mobilisée dans la partie en fiche, les valeurs de P_1 et P_2 sont alors indépendante de K_a et K_p . Elles sont par contre liées l'une à l'autre par les relations entre triangles similaires. La quatrième inconnue est alors définie par ε et déterminée à partir d'abaques que King a établis à partir d'essais expérimentaux sur modèles réduits centrifugés [King & McLoughlin, 1992].

Les méthodes présentées ici ne prennent pas en compte l'introduction des coefficients de sécurité qui sont généralement laissés à l'appréciation du projeteur et varient selon les pays. Les règles usuelles préconisent le plus souvent de majorer la hauteur en fiche (de 20 ou 30%), de réduire le coefficient de butée ou la butée totale.

2-4 Conclusion :

Nous n'aspérons pas ici à tirer des leçons générales sur le dimensionnement des ouvrages de soutènement que nous avons décrits, ni à déclarer qu'une des méthodes « est la bonne ». Nous nous contenterons modestement de refermer cette introduction par quelques remarques conclusives :

La méthode aux coefficients de réaction, méthode aujourd'hui la plus utilisée, semble montrer ses limites. Les avancées faites sur la détermination des paramètres, et notamment du coefficient de réaction, ne peuvent masquer le manque de fondement théorique de la méthode. Son utilisation est justifiée essentiellement par le fait que les sollicitations issues du calcul sont généralement surabondantes et conduisent ainsi à un supplément de sécurité (à l'exception notable de certains ouvrages butonnés).

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir être utilisée « pas à pas » en menant un calcul pour chaque étape de la construction. Elle permet donc d'intégrer l'historique de la réalisation.

La méthode des éléments finis semble la méthode la mieux appropriée à l'étude des problèmes de soutènement. Elle permet de modéliser le comportement de l'ensemble des éléments intervenant dans le comportement de l'ouvrage (sol, écran, eau, surcharges...) ainsi que les différents couplages entre ces éléments.

La méthode de Blum suppose un encastrement et donc des fiches plus longues. En pratique, elle fournit en effet des valeurs de fiches plus importantes que dans le cas du rideau simplement buté, mais avec des valeurs de moments maximums moins importantes, ce qui se traduit par des profils métalliques plus légers.

La diversité des méthodes de dimensionnement et des résultats qu'elles fournissent doit rappeler au concepteur d'ouvrage qu'elles ne sont pas des recettes exactes dont l'application scrupuleuse serait suffisante.

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 ψ , angles de frottements de l'interface δ et des angles de frottements du sol ϕ 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

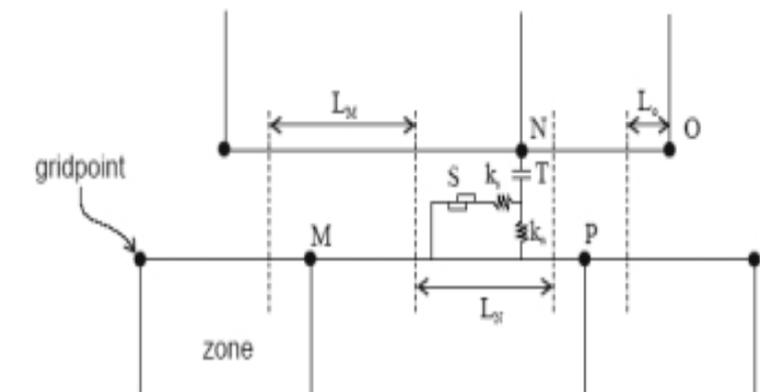
différences finies Flac ne nécessite pas le stockage d'une matrice de rigidité globale de grande taille : les équations sont reformulées à chaque pas.

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 ψ ,
- L'angle de frottement φ ,
- 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.

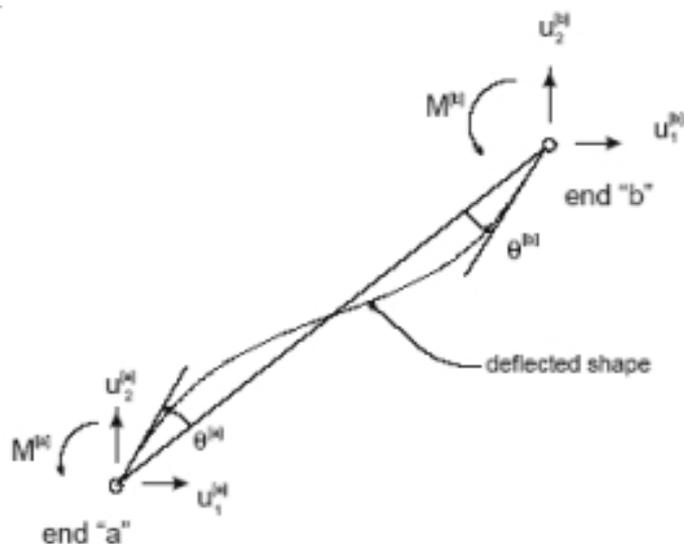


Figure 3-2 – Nomenclature pour un élément poutre

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

Un certain nombre de modèles de comportement (Équation $\sigma_n = f(\sigma_p, \varepsilon, k)$) 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 ε^e et plastique ε^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 σ_B est constant, le matériau est dit parfaitement plastique.
- Si σ_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.

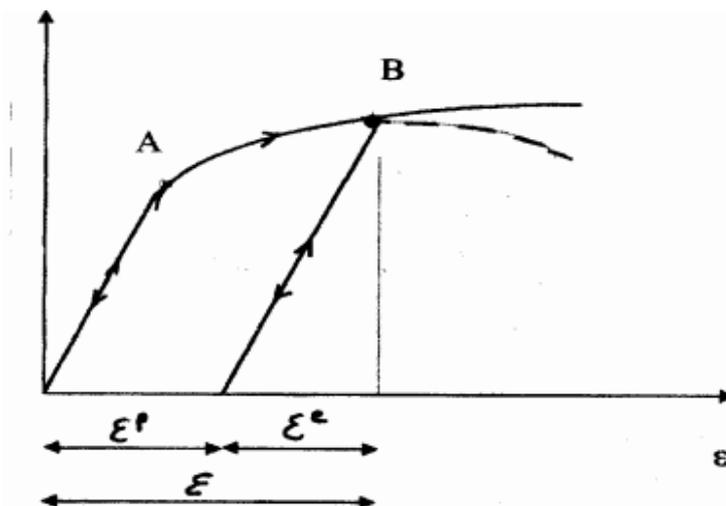


Figure 3-3- Comportement élasto-plastique avec écrouissage.

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'écrouissage.

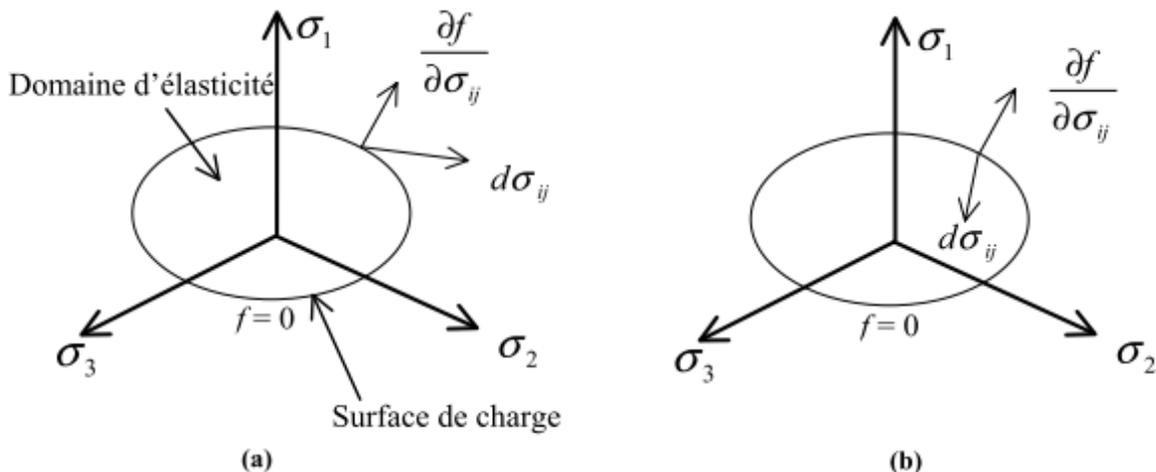


Figure 3-4 – Surface de charge. Cas de charge (a) et de décharge (b)

3-3-1-1-2 La règle d'écrouissage :

Un écrouissage 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'écrouissage. La loi d'écrouissage précise la modification de la surface de charge au cours de la déformation plastique. On distingue différents types d'écrouissage.

- Pour un écrouissage isotrope, la surface de charge subit une expansion ou une contraction au cours du processus de déformation.
- Pour un écrouissage cinématique, la surface de charge se déplace dans l'espace des contraintes.
- Pour un écrouissage 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.

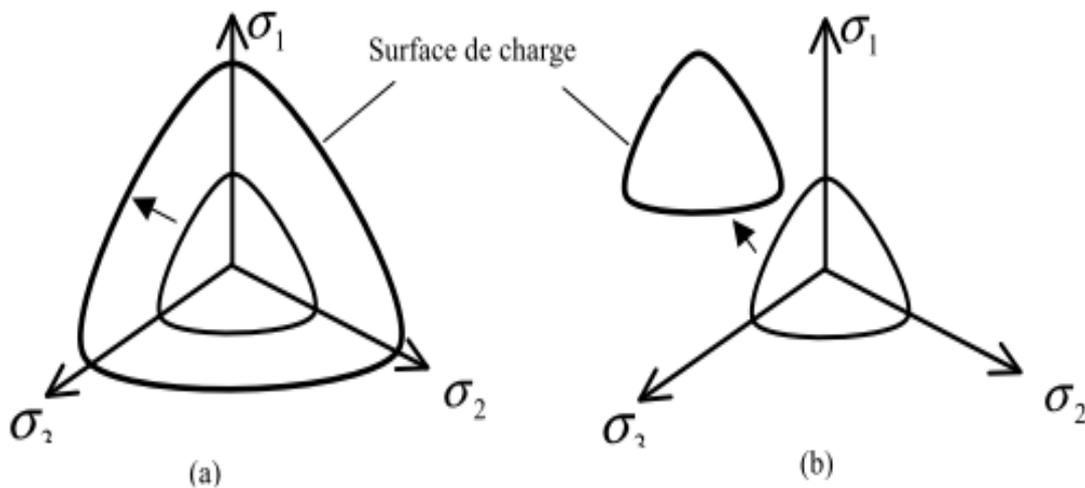


Figure 3-5 – Ecroissage isotrope (a) et cinématique (b)

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 $G(\sigma_{ij}) = 0$. 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.

$$\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$$

Où λ : Est le multiplicateur plastique (scalaire positif)

Pour un état de contrainte σ tel que $F = 0$, deux cas sont possibles :

a) 1^{er} cas :

$$F(\sigma, R) = 0$$

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

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

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

b) 2^{ème} cas :

$$F(\sigma, R) = 0$$

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

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

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, $G(\sigma_{ij})=0$ qui est distincte de celle représentative de la fonction de charge plastique $F(\sigma_{ij})=0$.

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 :

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

Où σ_1 et σ_3 représentent les contraintes principales extrêmes ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$).

Le paramètre c est la cohésion du matériau et φ 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.

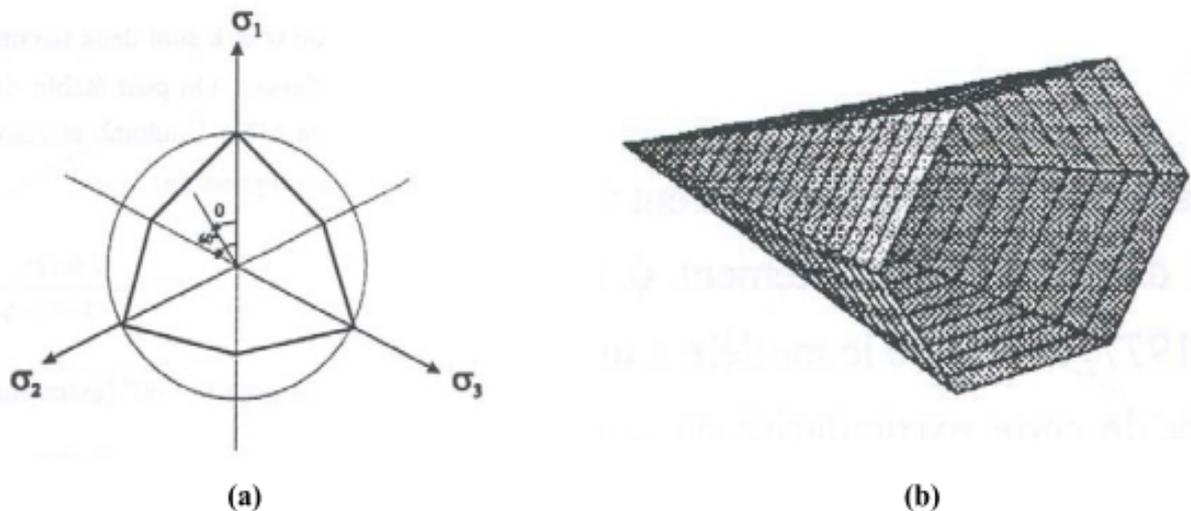
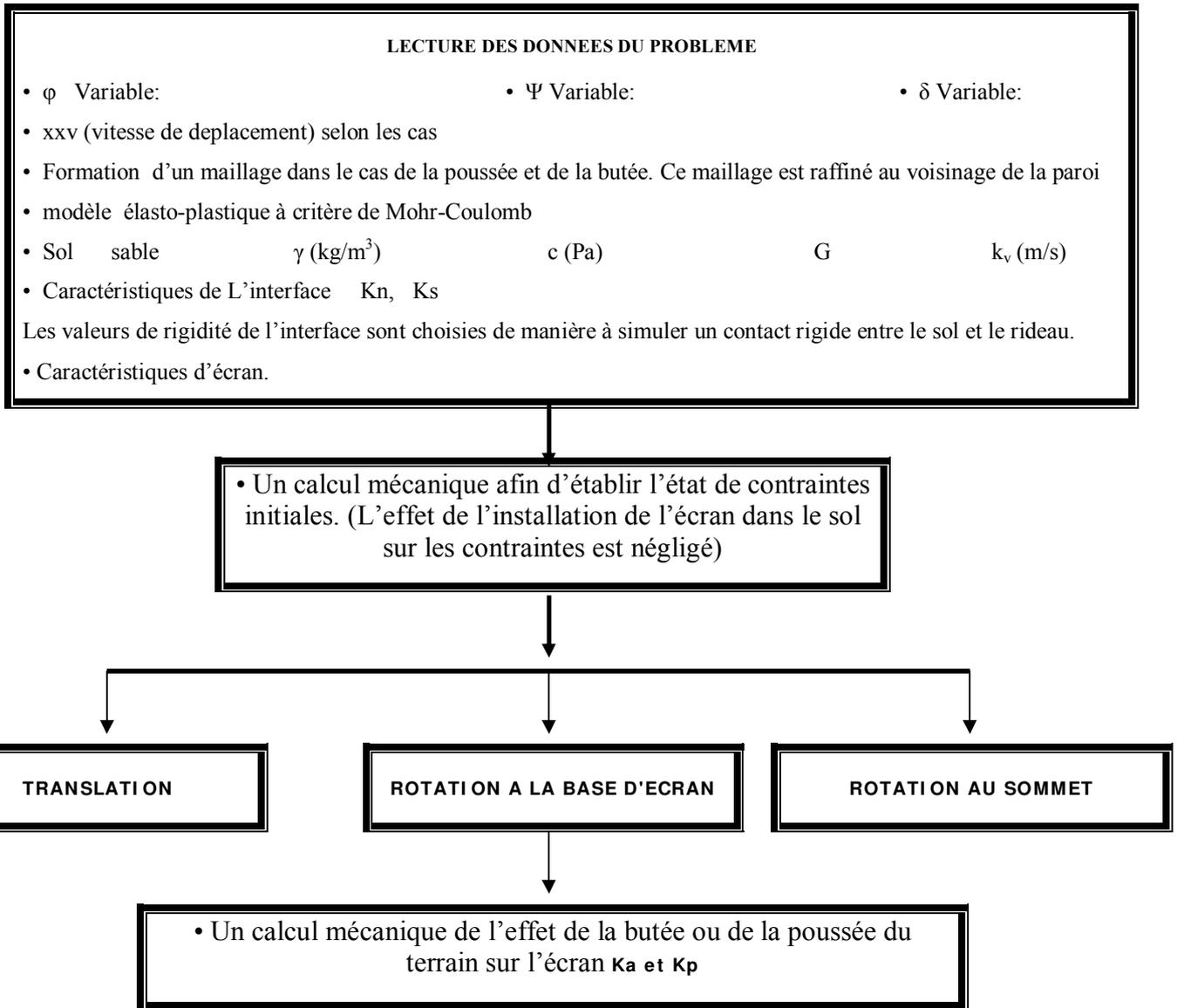


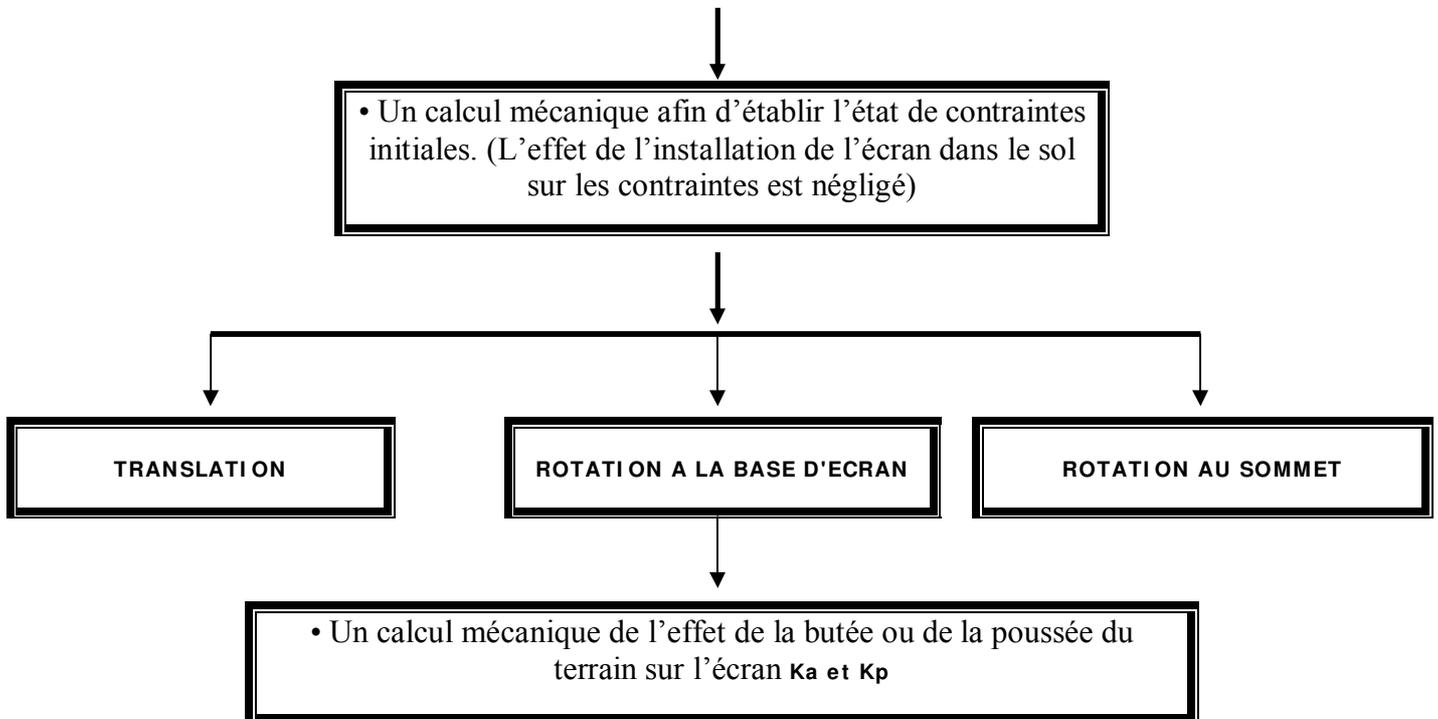
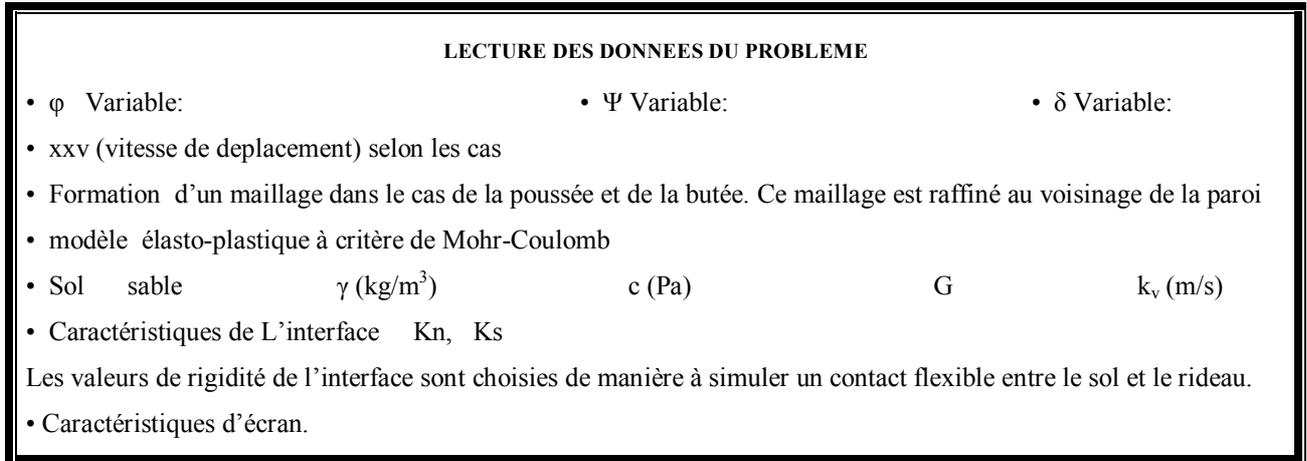
Figure 3-6 – Représentations du critère de Mohr-Coulomb : (a) – dans le plan déviatorique, (b) – dans l'espace des contraintes principales (Lee, 1994)

3-4 Programme de calcul adopté :

3-4-1 Ecran de soutènement rigide :



3-4-2 Ecran de soutènement flexible :



4-2 Ecran de soutènement flexible:

4-2-1 Influence de la flexibilité de l'écran sur les pressions de terre:

Dans le but d'examiner l'effet de la flexibilité de l'écran sur les pressions de terre, on a effectué plusieurs expérimentations numériques à l'aide du logiciel FLAC 2D.

On a retenu une flexibilité permettant d'avoir le comportement d'un mur flexible, on impose à l'écran les mouvements étudiés précédemment. L'objectif est de suivre la variation des valeurs de la pression de terre en fonction du déplacement de l'écran.

4-2-1-1 Pression active:

Les figures 4-25a, 4-25b, 4-25c montrent respectivement la variation de la distribution des pressions actives de terre le long de l'écran en fonction de son déplacement et le mode de mouvement auquel il est soumis.

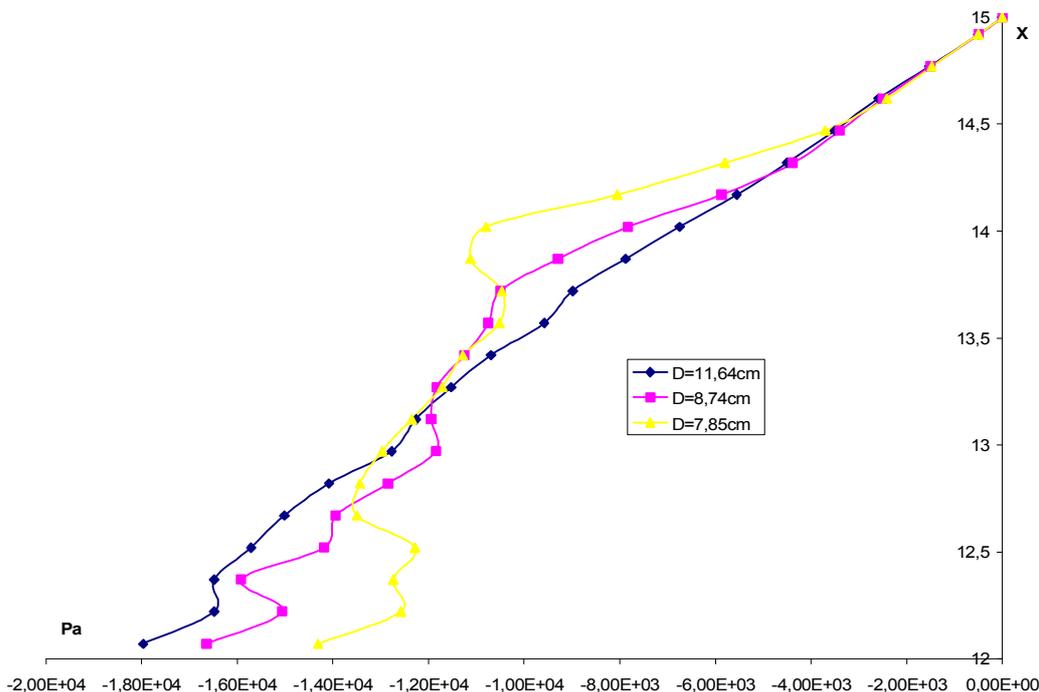


Figure 4-25a : Variation de la pression active le long de l'écran en cas de translation

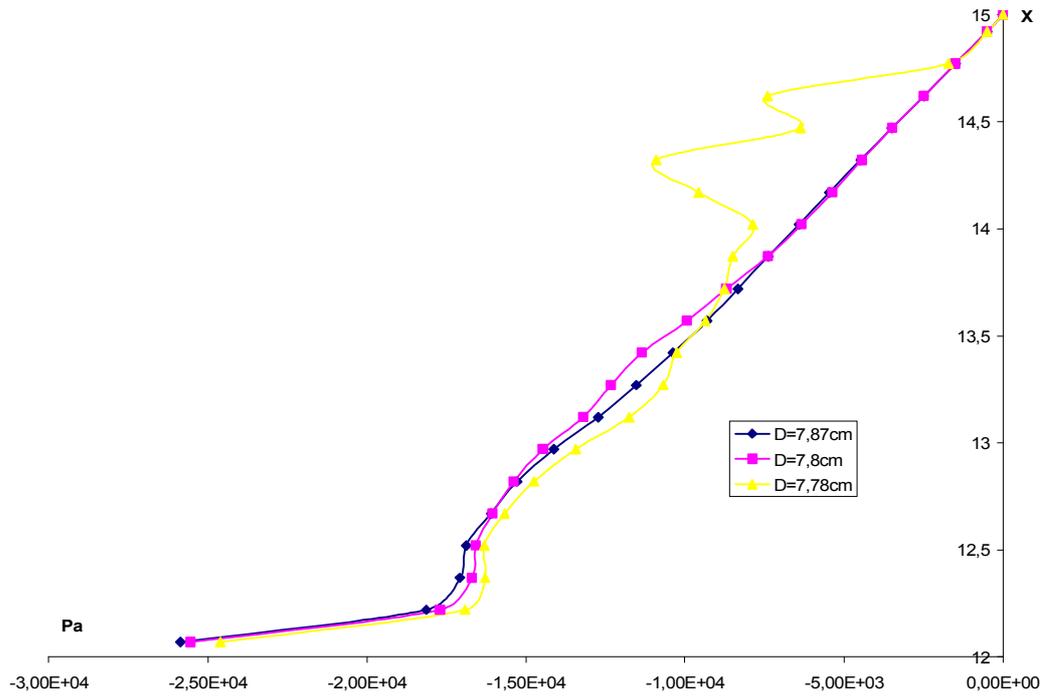


Figure 4-25b- Variation de la pression active le long de l'écran en cas de rotation par rapport à la base

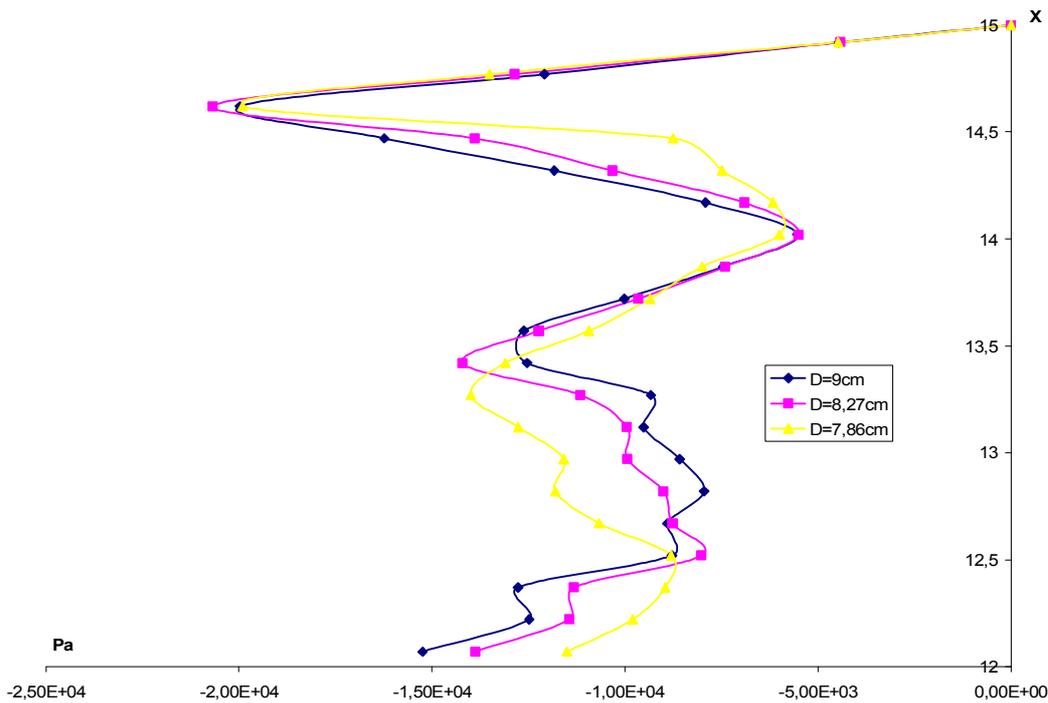


Figure 4-25c- Variation de la pression active le long de l'écran en cas de rotation par rapport au sommet

Les trois courbes montrent que l'allure du diagramme de la répartition des pressions ne change pas de forme pour chaque type de mouvement et qu'au fur et à mesure que l'écran s'écarte du sol le diagramme des pressions actives s'approche d'un diagramme d'un écran rigide et les résultats obtenus pour des faibles déplacements coïncident avec ceux d'un écran rigide. On note que la valeur du coefficient active K_a d'un écran rigide est la valeur extrême que peut avoir ce coefficient lorsque l'effet de voûte disparaîtra pour les deux modes de mouvement translation et rotation par rapport au sommet alors que la valeur du coefficient active K_a démarre d'une valeur importante et diminue avec l'écartement de l'écran du sol

4-2-1-2 Pression passive:

Les figures 4-26a, 4-26b, 4-26c montrent respectivement la variation de la distribution des pressions passives de terre le long de l'écran et en fonction du déplacement imposé et du mode de mouvement auquel il est soumis translation, rotation par rapport à la base ou rotation par rapport au sommet.

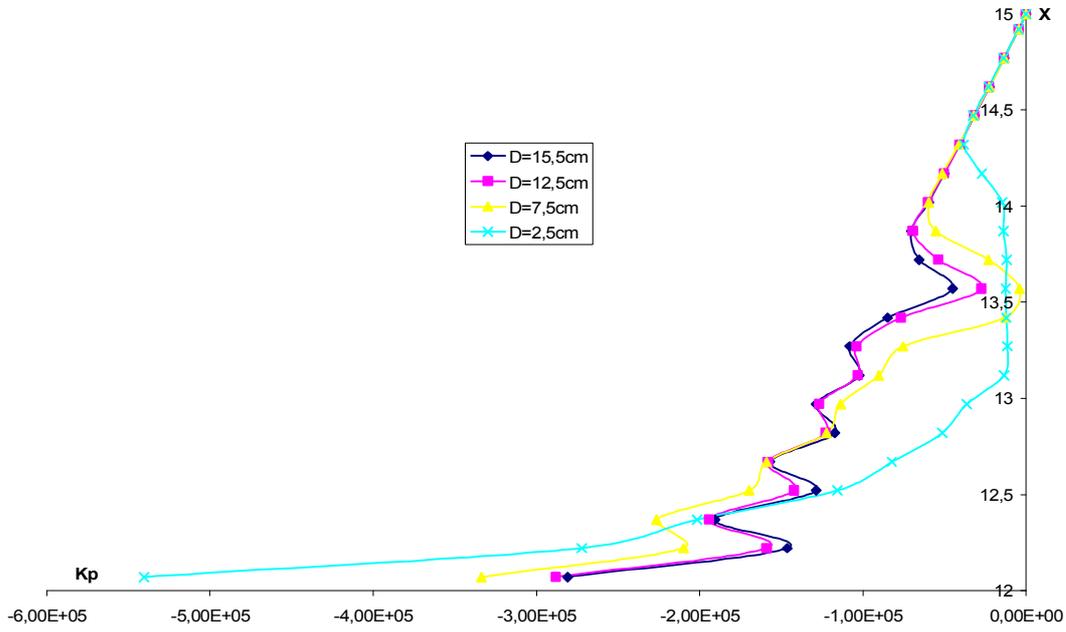


Figure 4-26a- Variation de la pression passive le long de l'écran en cas de translation

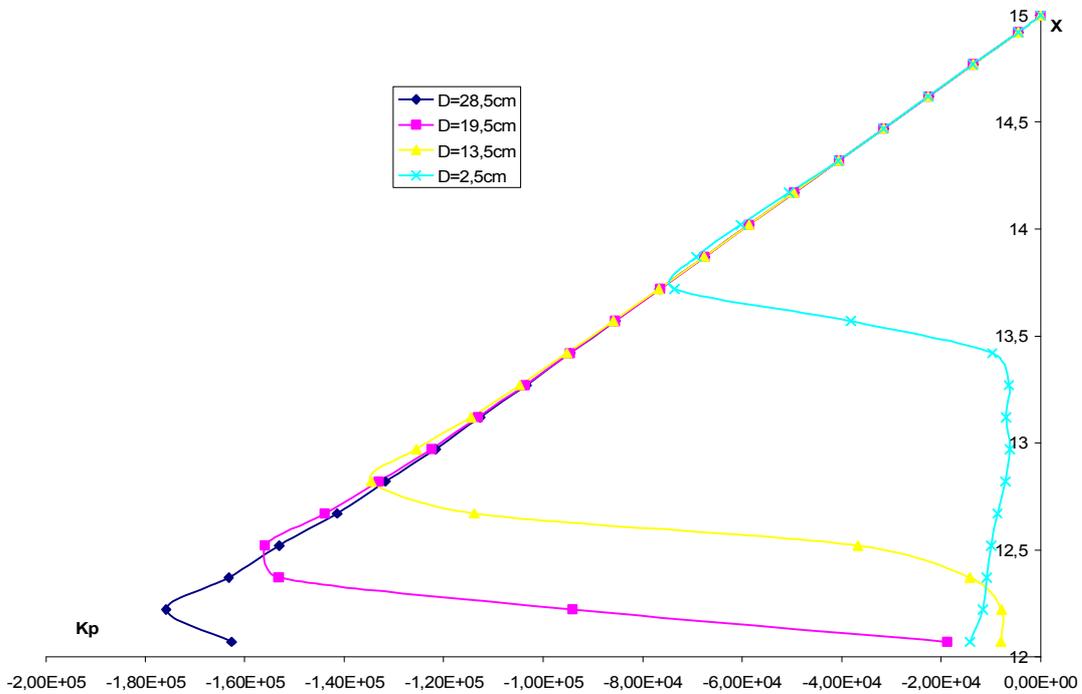


Figure 4-26b : Variation de la pression passive le long de l'écran en cas de rotation par rapport à la base

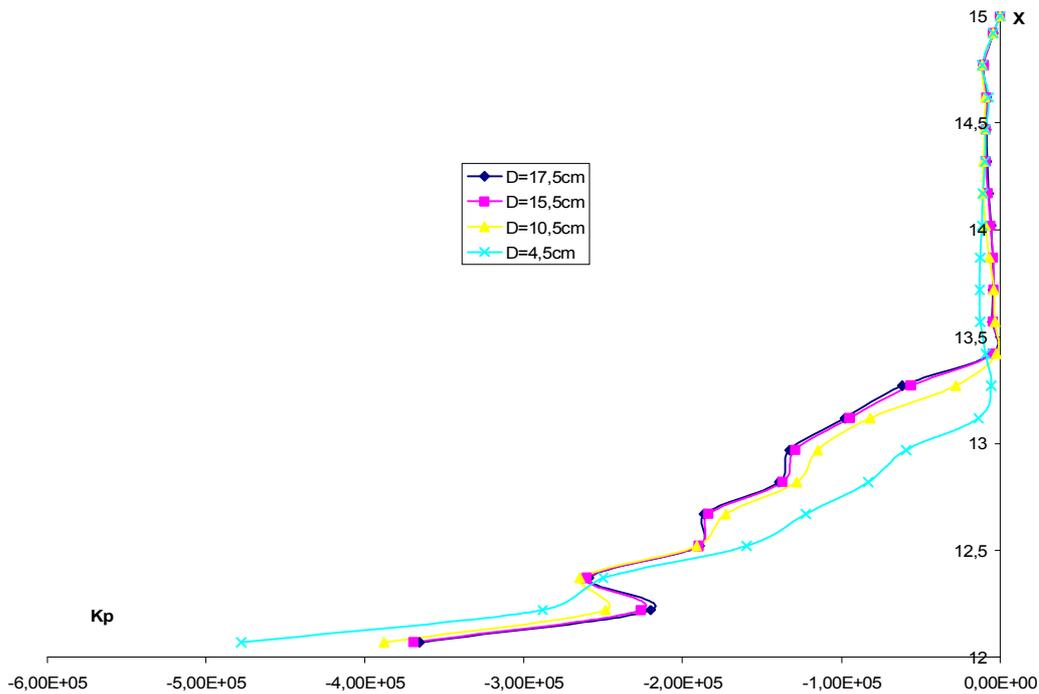


Figure 4-26c- Variation de la pression passive le long de l'écran en cas de rotation par rapport au sommet

Les trois courbes montrent que l'allure du diagramme de la répartition des pressions reste la même pour chaque mouvement et qu'au fur et à mesure que l'écran s'enfonce dans le sol le diagramme des pressions passives s'approche du diagramme d'un écran rigide et les résultats du coefficient de butée pour des déplacements importants coïncident avec ceux d'un écran rigide. On note que la valeur du coefficient passive K_p d'un écran rigide est la valeur extrême que peut avoir ce coefficient lorsque l'effet de voûte disparaîtra.

CHAPITRE 04 :

I N F L U E N C E D E S M O D E S D U M O U V E M E N T E T L A F L E X I B I L I T E D ' E C R A N S U R L E S P R E S S I O N S P A S S I V E S E T A C T I V E S D E S T E R R E S

Introduction :

L'évaluation de la pression active et passive de la terre agissant sur un écran rigide de soutènement est très importante dans la conception de beaucoup de structures géotechniques, (en particulier les murs de soutènement). Les ingénieurs ont traditionnellement calculé la pression active et passive mise à la terre contre les murs rigides en utilisant la théorie de Coulomb ou la formulation de Rankine. Tous les deux supposent que la distribution de la pression active et passive de la terre exercée contre le mur est triangulaire.

Cependant, beaucoup de résultats expérimentaux (Tsagareli, 1965; Matsuo et autres, 1978; Fang et Ishibashi, 1986) démontrent que la distribution de la pression active et passive sur un mur rugueux ($\delta \neq 0$), dépend du mode du mouvement de mur (rotation par rapport au sommet, rotation par rapport à la base ou translation horizontale) est non linéaire, elle est différente de la présentation faite par Coulomb et Rankine. La non-linéarité de la distribution active ou passive de pression des terres résulte des effets de voûte (Handy, 1985)

Un exemple simple d'effet de voûte (inspiré d'ailleurs par Terzaghi (1943) a illustré le concept) est ce qui se produit dans une grande boîte de sol avec un panneau à la base. Quand ce panneau est abaissé, le sol immédiatement au-dessus de lui tendra à se déplacer vers le bas avec lui figure.4-1. Cependant, si la résistance au cisaillement du sol est suffisamment grande, ce qui se produira à la place, est que le poids de la colonne du sol au-dessus du panneau immédiatement mobile sera partiellement transféré au sol. Naturellement, les efforts verticaux dans le sol autour du panneau mobile augmenteront, alors que ceux immédiatement au-dessus de lui diminueront.

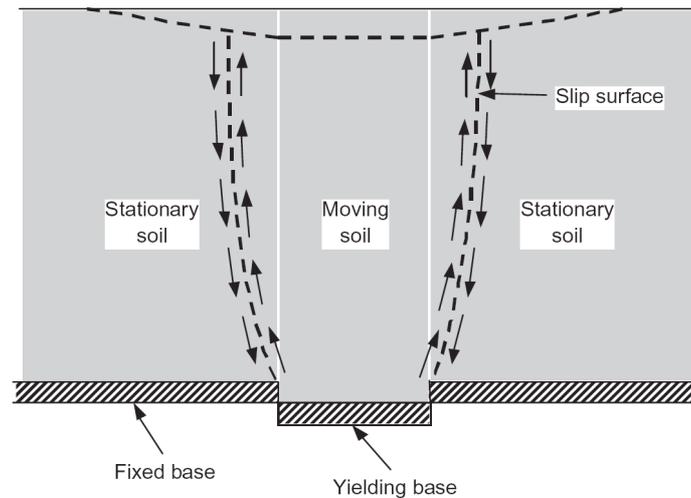


Figure. 4-1- Redistribution d'effort provoquée par l'effet de voûte

Dans ce chapitre la première partie est consacrée à l'estimation numérique de K_p , et K_a coefficients de butée et de poussée respectivement derrière un écran de soutènement rigide d'un côté et le changement de la distribution des pressions de terre passive et active à l'aide du logiciel FLAC 2D et la méthode des différences finis, sous l'influence des angles δ ; ψ ; φ , et sous l'influence du mode de mouvement (translation, rotation par rapport à la base, rotation par rapport au sommet) d'un autre côté.

La deuxième partie est consacrée à la même étude mais derrière un écran de soutènement flexible sous l'influence de la rigidité de l'écran.

Les comparaisons entre les valeurs calculées par nos programmes et mesurées par des solutions existantes Coulomb-Rankine (1776) Caquot-Kerisel (1948) Soubra (2000) Soubra-Macuh (2002) et Bouali Meriem Fakhreddine et N.Bembarck et al (2008) montrent que les programmes proposées prédisent les résultats de manière satisfaisante.

On présente les résultats numériques sous forme de tableaux suivis d'une interprétation et d'une discussion.

Dans la présente étude nous aborderons en premier lieu, le cas des écrans rigides puis le cas des écrans flexibles

4-1 Ecran de soutènement rigide :

4-1-1 Les cas étudiés :

La simulation numérique de la butée et de la poussée est réalisée à l'aide du logiciel FLAC2D. Les figures 4-2a; 4-2b et 4-2c montrent respectivement la modélisation d'un mur de soutènement rigide soumis à trois modes de mouvements ; translation horizontale (T) rotation par rapport à la base (RB) et rotation par rapport au sommet (RS).

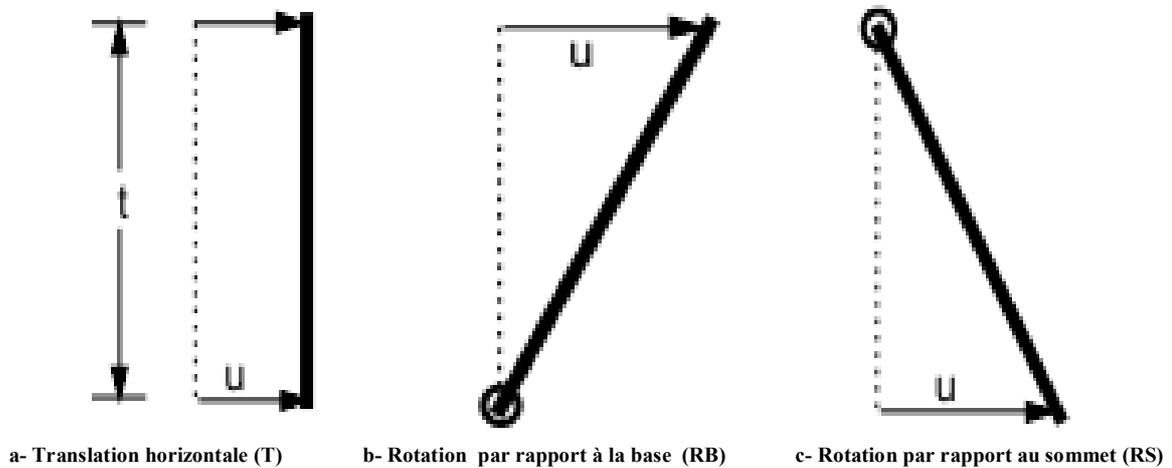


Figure 4-2-Types du mouvement de mur

4-1-2 Présentation des cas étudiés :

On considère un écran rigide d'une longueur égale à t ; un sol homogène isotrope pulvérulent, et une interface.

4-1-2-1 Caractéristiques du sol :

L'un des paramètres les plus importants pour le comportement d'un soutènement est la nature du terrain. Le type de sol, la stratification, les caractéristiques anisotropes du matériau et l'état des contraintes in-situ sont des facteurs primordiaux et pour des raisons de simplification et d'efficacité, le comportement du massif de sol est décrit au moyen du modèle élasto-plastique à critère de Mohr-Coulomb, qui comporte cinq paramètres :

En élasticité,

E: Module d'élasticité de Young,

v: Coefficient de Poisson,

En plasticité,

C: Cohésion,

ϕ : Angle de frottement interne du sol.

ψ : Angle de dilatance de sol.

Sol	γ (kg/m)	c (Pa)	ϕ, ψ (degré)	G	kv(m/s)
sable	2000	0	(10;15;20;25;30;35;40)	$2.5 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$

γ : Poids volumique

K_v : Module volumique

G: Module de cisaillement

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

4-1-2-2 Maillage :

La figure 4-3 montre le maillage retenu pour la simulation dans le cas de la poussée et de la butée. Ce maillage est raffiné au voisinage de la paroi.

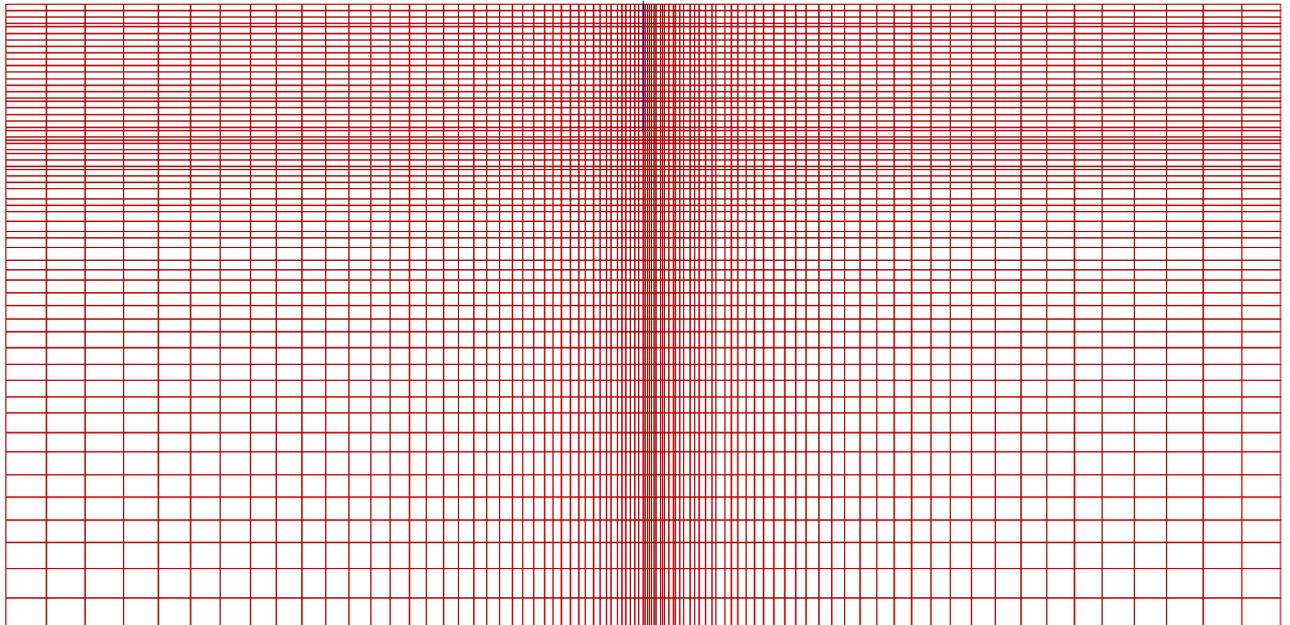


Figure 4-3- le maillage retenu

4-1-2-3 Dimensions et conditions aux limites :

Les conditions aux limites consistent à bloquer :

- Les déplacements horizontaux sur les deux faces verticales ($U_x = 0$)
- Les déplacements horizontaux et verticaux à la base du maillage, ($U_x = U_y = 0$)

4-1-2-4 Caractéristiques de l'interface :

L'interface est caractérisée par un angle de frottement δ , une cohésion nulle, une rigidité normale $K_n = 10^9$ Pa/m et une rigidité de cisaillement $K_s = 10^9$ Pa/m. Les valeurs de rigidité de l'interface sont choisies de manière à simuler un contact rigide entre le sol et le rideau.

4-1-2-5 Caractéristiques de l'écran :

La modélisation bidimensionnelle d'un rideau et de son comportement en flexion peut être réalisée de deux manières différentes :

- Soit avec des éléments massifs,
- Soit avec des éléments poutres à condition que la compatibilité soit assurée.

L'écran rigide est modélisé par des éléments quadrilatères. Il est connecté au sol via des éléments d'interface de type Mohr – Coulomb.

4-1-2-6 Procédure de simulation :

La procédure de simulation de la butée ou de la poussée du terrain soutenu par un écran de soutènement rigide adoptée dans la présente analyse est basée sur les deux étapes suivantes :

- Un calcul mécanique afin d'établir l'état de contraintes initiales. (L'effet de l'installation de l'écran dans le sol sur les contraintes est négligé)
- Un calcul mécanique de l'effet de la butée ou de la poussée du terrain sur l'écran.

a- Cas de translation horizontal de l'écran :

On impose à l'écran (sur le long de sa hauteur) une vitesse de déplacement très faible vers le sol et sur une direction, la résistance maximale à la butée ou minimale à la poussée du terrain est générée en imposant une vitesse de déplacement des nœuds des éléments qui discrétisent l'écran. Le déplacement des nœuds du sol en contact avec l'écran obéit à la loi

de comportement de l'interface sol-écran. Au cours du déplacement de l'écran, on enregistre la butée ou la poussée à travers la résultante des contraintes normales sur l'écran.

$$K_p = 2.P_p / \gamma.t^2 = 2.P_x / \gamma.t^2 . \cos\delta$$

Avec :

P_p : Résultante de la butée du terrain ;

P_a : Résultante de la poussée du terrain ;

P_x : Résultante de contraintes normales sur l'écran ;

γ : Poids volumiques du sol ;

t : Hauteur de l'écran ;

δ : Angle de frottement de l'interface.

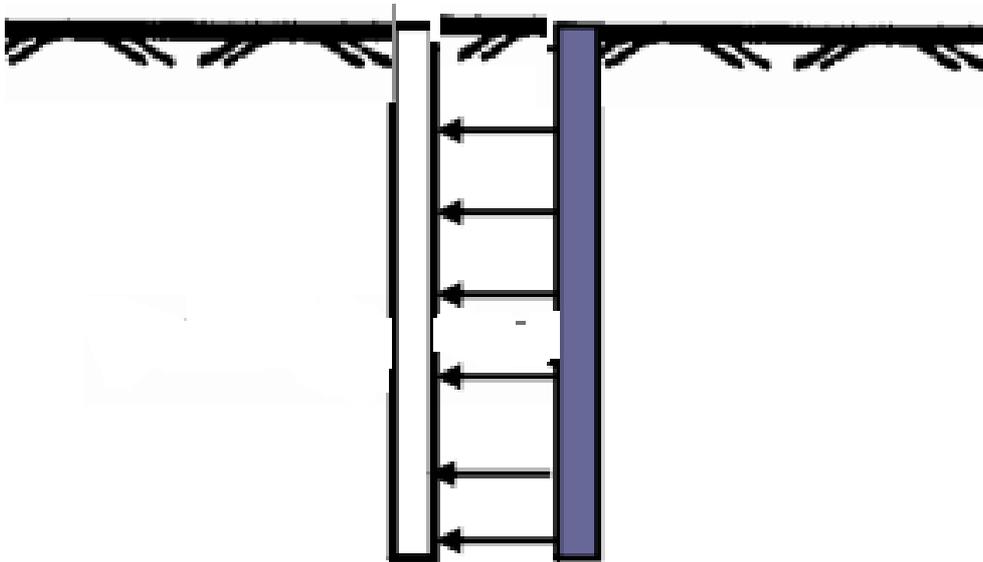


Figure 4-4- Présentation de la poussée et de la butée en cas de translation

b - Cas de rotation par rapport à la base de l'écran :

On impose à l'écran (sur le nœud de la tête d'écran) une vitesse de déplacement très faible vers le sol et sur une direction, la résistance maximale à la butée ou minimale à la poussée du terrain est générée. Le déplacement des nœuds du sol en contact avec l'écran obéit à la loi de comportement de l'interface sol-écran. Au cours du déplacement de l'écran, on enregistre la butée ou la poussée à travers la résultante des contraintes normales sur l'écran.

c- Cas de rotation par rapport au sommet de l'écran :

On impose à l'écran (sur le nœud de la base d'écran) une vitesse de déplacement très faible vers le sol et sur une direction, la résistance maximale à la butée ou minimale à la poussée du terrain est générée. Le déplacement des nœuds du sol en contact avec l'écran obéit à la loi de comportement de l'interface sol-écran. Au cours du déplacement de l'écran, on enregistre la butée ou la poussée à travers la résultante des contraintes normales sur l'écran.

4-1-3 Présentation des résultats numériques:

Dans le but de mettre en évidence la sensibilité du coefficient de la pression passive et active des terres, à l'angle de frottement interne ϕ , à l'angle de l'interface δ , l'angle de dilataance ψ et aux modes de mouvement (T, RB, RS), les tableaux (4-1) à (4-7) et (4-8) à (4-14) donnent respectivement les coefficients de la pression active et passive effective des terres pour quatre valeurs de l'angle de l'interface $\delta/\phi = 0, 1/3, 2/3$ et 1, et pour trois valeurs de l'angle de dilataance $\psi/\phi = 0, 1/2, (1 \text{ ou } 2/3)$, pour sept valeurs de l'angle de frottement interne $\phi = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$

Tableau 4-1-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 10^\circ$										
δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.70	0.70	0.72	0.704	0.704				
	5	0.69	0.70	0.71						
	10	0.69	0.70	0.70						
5	0	0.66	0.66	0.69	0.662	0.664				
	5	0.66	0.66	0.68						
	10	0.66	0.66	0.67						
10	0	0.64	0.65	0.67	0.634	0.642				
	5	0.64	0.65	0.66						
	10	0.64	0.65	0.66						

Tableau 4-2-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 15^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.58	0.59	0.59	0.588	0.589				
	15	0.58	0.59	0.58						
5	0	0.55	0.56	0.57	0.555	0.557				
	15	0.54	0.56	0.56						
10	0	0.53	0.54	0.55	0.532	0.536				
	15	0.53	0.54	0.55						
15	0	0.53	0.53	0.55	0.517	0.525				
	15	0.52	0.53	0.54						

Tableau 4-3-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 20^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.48	0.49	0.49	0.490	0.490				0.49
	10	0.48	0.49	0.49						0.48
	20	0.48	0.49	0.49			0.47	0.47	0.50	0.48
10	0	0.45	0.45	0.47	0.448	0.446				
	10	0.44	0.45	0.47						
	20	0.44	0.45	0.47						
20	0	0.44	0.44	0.47	0.434	0.429				
	10	0.43	0.44	0.46						
	20	0.43	0.44	0.46			0.42	0.44	0.49	

Tableau 4-4-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 25^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.40	0.40	0.43	0.405	0.406				
	25	0.39	0.41	0.42						
25	0	0.37	0.37	0.42	0.355	0.361				
	25	0.35	0.37	0.39						

Tableau 4-5-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 30^\circ$										
δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.33	0.33	0.39	0.333	0.333				0.34
	15	0.32	0.33	0.38						0.32
	30	0.32	0.34	0.35			0.33	0.31	0.35	0.32
10	0	0.31	0.31	0.37	0.308	0.309				0.32
	15	0.30	0.31	0.36						0.31
	30	0.30	0.32	0.33			0.30	0.30	0.33	0.31
15	0	0.31	0.30	0.37	0.301	0.302				
	15	0.29	0.31	0.35						
	30	0.29	0.31	0.33						
20	0	0.31	0.31	0.37	0.297	0.299				0.31
	15	0.29	0.31	0.35						0.30
	30	0.28	0.31	0.33			0.31	0.31	0.36	0.29
30	0	0.31	0.31	0.39	0.297	0.302				
	15	0.31	0.31	0.36						
	30	0.29	0.31	0.33			0.42	0.40	0.43	

Tableau 4-6-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 35^\circ$										
δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.27	0.27	0.36	0.270	0.271				0.30
	35	0.26	0.29	0.29						0.26
35	0	0.26	0.27	0.37	0.254	0.254				
	35	0.25	0.27	0.29						

Tableau 4-7-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 40^\circ$										
δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.21	0.21	0.33	0.217	0.214				0.26
	20	0.21	0.21	0.31						0.22
	40	0.20	0.21	0.23						0.21
20	0	0.20	0.20	0.31	0.199	0.200				
	20	0.20	0.20	0.28						
	40	0.19	0.20	0.23						
40	0	0.22	0.22	0.34	0.210	0.214				
	20	0.21	0.22	0.31						
	40	0.21	0.22	0.29						

Tableau 4-8-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 10^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	1.42	1.41	1.38	1.42	1.42						
	5	1.42	1.41	1.38								
	10	1.43	1.42	1.38								
5	0	1.55	1.54	1.50	1.56	1.56						
	5	1.56	1.54	1.50								
	10	1.56	1.55	1.50								
10	0	1.66	1.64	1.59	1.73	1.68						
	5	1.66	1.63	1.59								
	10	1.66	1.64	1.59								

Tableau 4-9-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 15^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	1.70	1.65	1.65	1.69	1.70						
	15	1.72	1.69	1.65								
5	0	1.89	1.84	1.82	1.90	1.89						
	15	1.90	1.87	1.82								
10	0	2.07	2.01	1.95	2.13	2.08						
	15	2.08	2.04	1.95								
15	0	2.21	2.15	2.03	2.40	2.27						
	15	2.21	2.15	2.03								

Tableau 4-10-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 20^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	2.04	1.98	1.98	2.03	2.13						2.06
	10	2.06	2.01	1.98								2.07
	20	2.06	2.04	1.98					2.13	2.09	2.03	2.07
10	0	2.56	2.43	2.39	2.63	2.58						
	10	2.58	2.51	2.39								
	20	2.58	2.55	2.39								
20	0	2.96	2.85	2.60	3.52	3.03	3.12	3.13				
	10	3.02	2.98	2.72								
	20	3.02	3.02	2.74					3.03	3.03	2.72	

Tableau 4-11-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 25^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	2.46	2.35	2.35	2.46	2.46						
	25	2.52	2.44	2.37								
25	0	3.95	3.83	3.28	5.59	4.62						
	25	4.35	4.35	3.80								

Tableau 4-12-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 30^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	2.95	2.77	2.82	3.00	3.11						2.98
	15	3.04	2.93	2.92								3.04
	30	3.09	2.97	2.92					3.11	3.10	2.89	3.06
10	0	3.98	3.71	3.50	4.14	4.01						3.98
	15	4.05	3.90	3.65								4.03
	30	4.06	4.01	3.65					4.01	4.10	3.54	4.03
15	0	4.49	4.26	3.58	4.97	4.71						
	15	4.62	4.45	4.07								
	30	4.64	4.61	4.07								
20	0	4.85	4.84	3.84	6.10	5.10						4.92
	15	5.22	5.06	4.46								5.17
	30	5.27	5.22	4.48					5.10	5.30	4.37	5.210
30	0	5.30	5.76	4.19	10.09	6.30	6.86	6.93				
	15	6.31	6.26	5.33								
	30	6.47	6.46	5.55					6.30	6.45	5.21	6.33

Tableau 4-13-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 35^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BEN MEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	3.54	3.25	3.46	3.69	3.69						3.54
	35	3.81	3.70	3.54								3.76
35	0	7.13	8.45	5.36	22.97	11.7	11.13					
	35	10.22	9.93	8.61								10.10

Tableau 4-14-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 40^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)
		T	RB	RS				
0	0	4.32	3.89	4.24	4.59	4.60		
	20	4.67	4.42	4.42				
	40	4.71	4.66	4.46				
20	0	7.75	6.90	5.56	11.77	10.1		
	20	9.48	8.97	7.43				
	40	9.75	9.72	7.78				
40	0	9.72	9.90	6.90	92.55	20.9	19.62	20.01
	20	16.44	16.44	12.55				
	40	16.97	16.87	13.97				

4-1-4 L'influence du mode de mouvement et des angles δ ; ψ ; φ ; sur l'évaluation des coefficients et les diagrammes de pression de terre contre l'écran de soutènement rigide :

Le calcul du k_a et k_p est basé sur la technique d'augmentation du déplacement d'écran jusqu'à l'obtention d'un mécanisme de rupture (détection de l'instabilité à travers le suivi de l'historique du déplacement horizontal de l'écran et de la force passive ou active), c'est à dire l'enfoncement de l'écran dans le sol est accompagné par l'augmentation progressive de la force normale effective passive ou active des terres P_p et P_a respectivement qui se stabilise en indiquant un palier. Ce palier correspond à la force maximale de la composante horizontale de la butée ou de la poussée.

Les résultats de la variation des coefficients de pression de terre active et passive autour d'un écran rigide, en fonction de l'angle de frottement interne du sol et de l'interface sol-écran et aussi l'angle de dilatance du sol ayant un effet presque négligeable est récapitulé dans les tableaux (4-1) à (4-14).

4-1-4-1 Pression active de terre (K_a) :

Les différentes valeurs du coefficient actif de la terre K_a pour les différents modes de mouvement, présentées ci-dessus, sont regroupées dans les tableaux (4-1) à (4-7) pour des raisons de comparaison avec quatre solutions existantes de Coulomb-Rankine (1776), Caquot- Kérisel (1948), Bouali Meriem Fakhreddine, et Benmebarek.

4-1-4-2 Évaluation de la pression active (k_a) de terre contre l'écran rigide :

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-1) à (4-7) permet d'établir les interprétations suivantes :

Les tableaux (4-1) à (4-7) montrent la diminution du coefficient actif de la terre (K_a) quelle que soit le mode de mouvement avec :

- **l'augmentation de l'angle de frottement du sol φ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement de l'interface sol-paroi $\delta = (0, 1/2, 1/3, 2/3, 1) \varphi$ ou les valeurs des angles de dilatance du sol $\psi = (0, 1, 1/2) \varphi$.
- **l'augmentation de l'angle de frottement sol-paroi δ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement du sol φ ou les valeurs des angles de dilatance du sol $\psi = (0, 1/2, 1) \varphi$.
- **l'augmentation de l'angle de dilatance du sol ψ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement du sol φ ou les valeurs des angles de frottement de l'interface sol-paroi $\delta = (0, 1/2, 1/3, 2/3, 1)$, on constate que la variation de l'angle de dilatance ψ donne une légère augmentation du coefficient de poussée uniquement pour le mode de mouvement de rotation par rapport à la base et pour les angles de frottements interne du sol ($\varphi = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$) et l'angle de frottement de l'interface sol-paroi ($\delta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$).

l'effet de la dilatance ψ présente une faible sensibilité ou presque négligeable devant la sensibilité des angles de frottements interne du sol φ , et des angles de frottement de l'interface sol-paroi δ .

L'effet de frottement interne φ est plus significatif que les deux autres effets étudiés (effet de l'angle de frottement de l'interface sol-paroi δ et l'effet de l'angle de dilatance ψ) pour les trois modes de mouvements translation, rotation par rapport à la base et rotation par rapport au sommet.

4-1-4-2-1 Cas de translation :

Le figure 4-5, montre la variation de la force horizontale active en fonction du déplacement horizontal de l'écran rigide avec $\varphi = \delta = \psi = 40^\circ$.

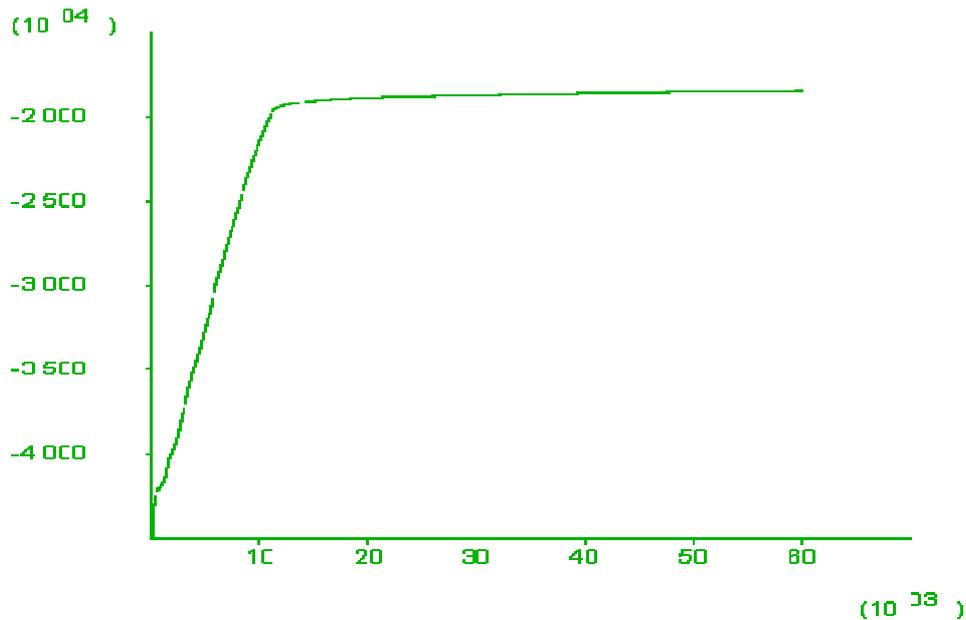


Figure 4-5- Montre la variation de la force horizontale active en fonction du déplacement horizontal de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ et ($\varphi = \psi = 40^\circ$)

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-1) à (4-7) permet d'établir les observations suivantes :

- Les valeurs du coefficient actif de terre K_a obtenues numériquement (FLAC 2D) sont en parfait accord avec les valeurs actuellement utilisées de Caquot–Kérisel, et les valeurs de Coulomb-Rankine.
- Les valeurs du coefficient actif de la terre K_a obtenues numériquement (FLAC 2D) sont très proches à celles de Bouali Meriem Fakhreddine avec une différence n'excédant pas 9.1%, sauf pour $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$ où on observe une différence importante.

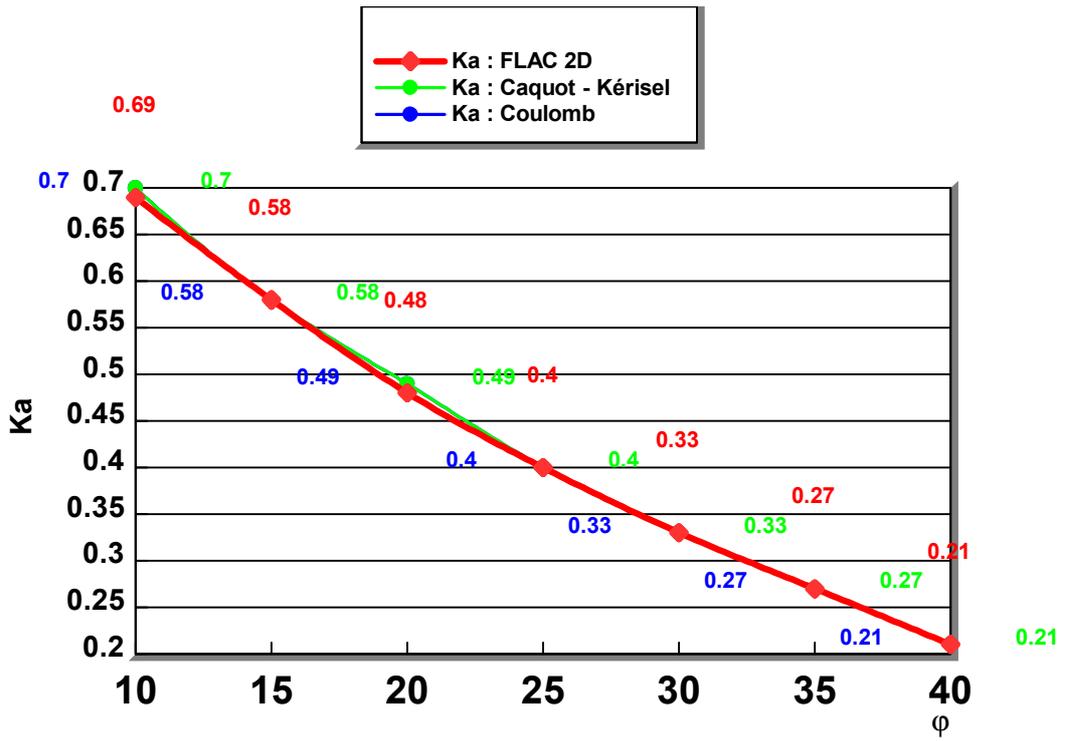


Figure 4-6a Cas de translation avec $\phi = \psi$, et $\delta = 0^\circ$

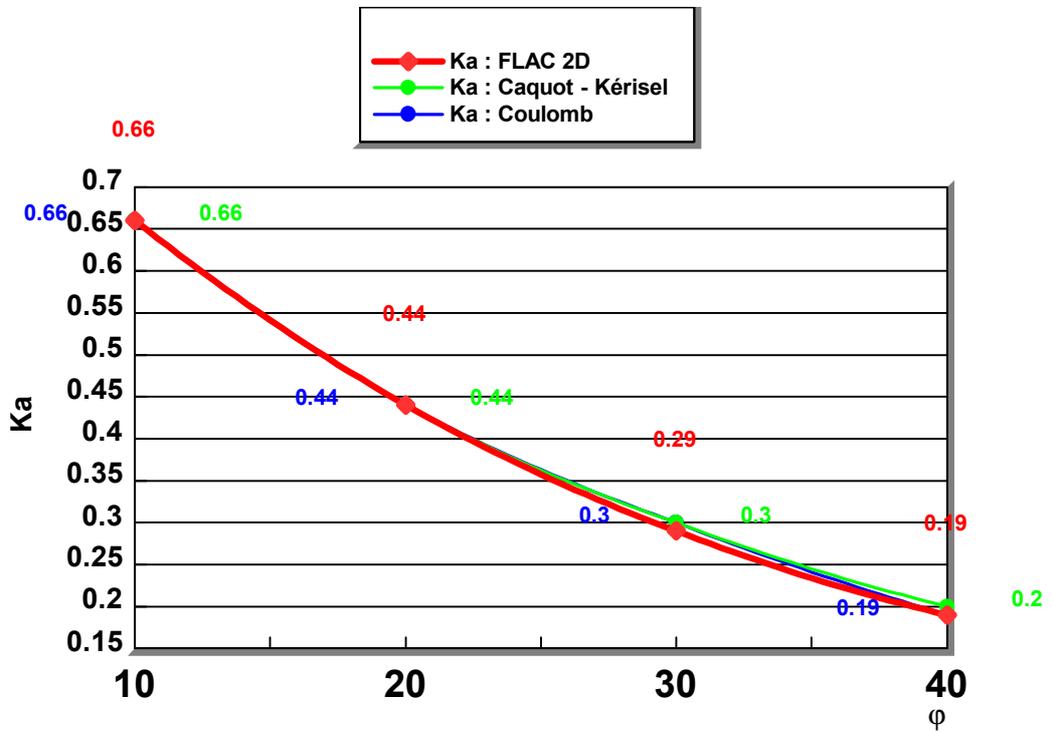


Figure 4-6b Cas de translation avec $\phi = \psi$, et $\delta = 1/2 \phi$

4-1-4-2-1-1 Distribution de la pression active de terre contre l'écran:

Les figures 4-7a, 4-7b, présentent le changement de la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

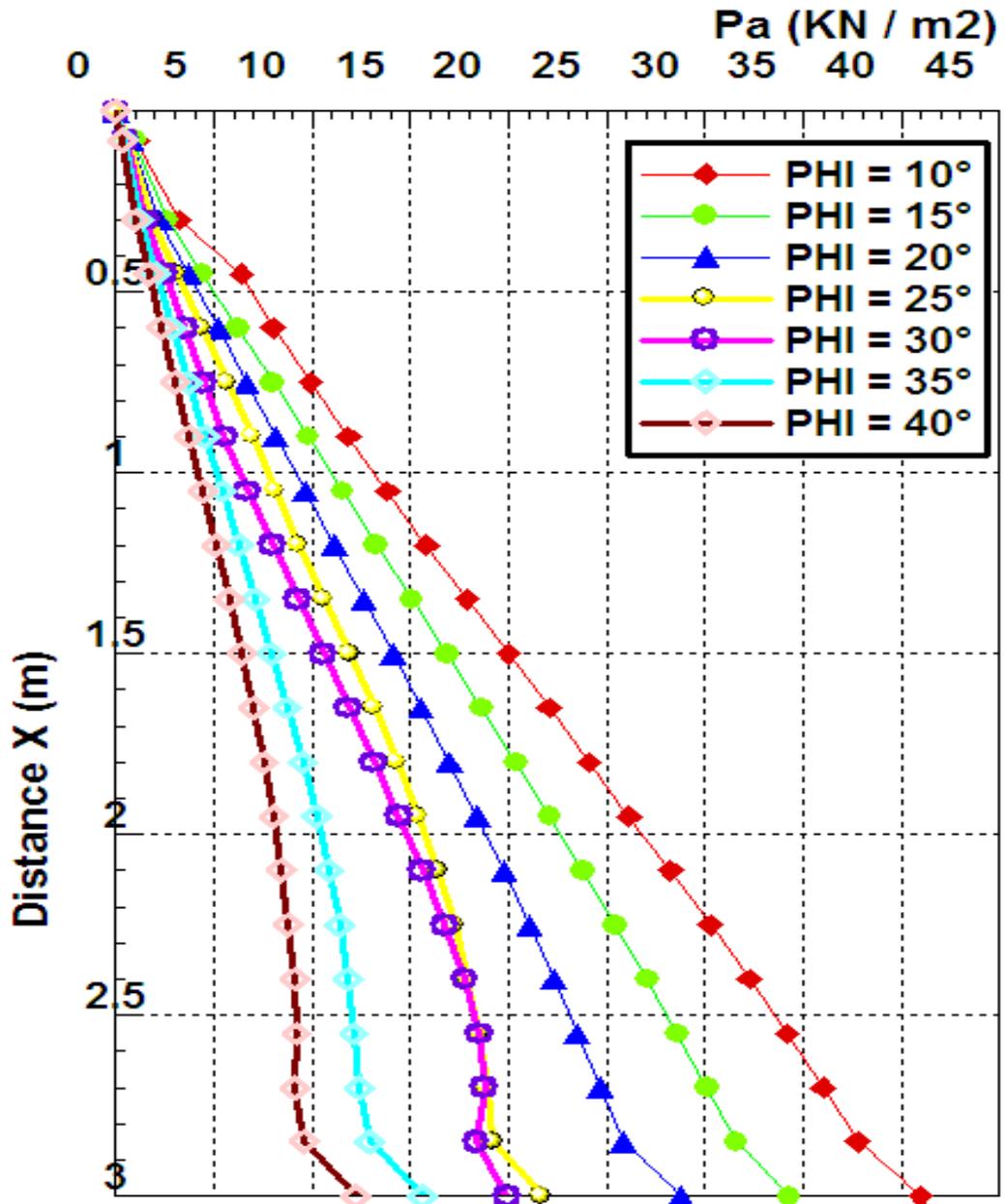


Figure 4-7a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran lisse $\delta = 0^\circ$ et rigide avec $\psi = \varphi$
Cas de translation

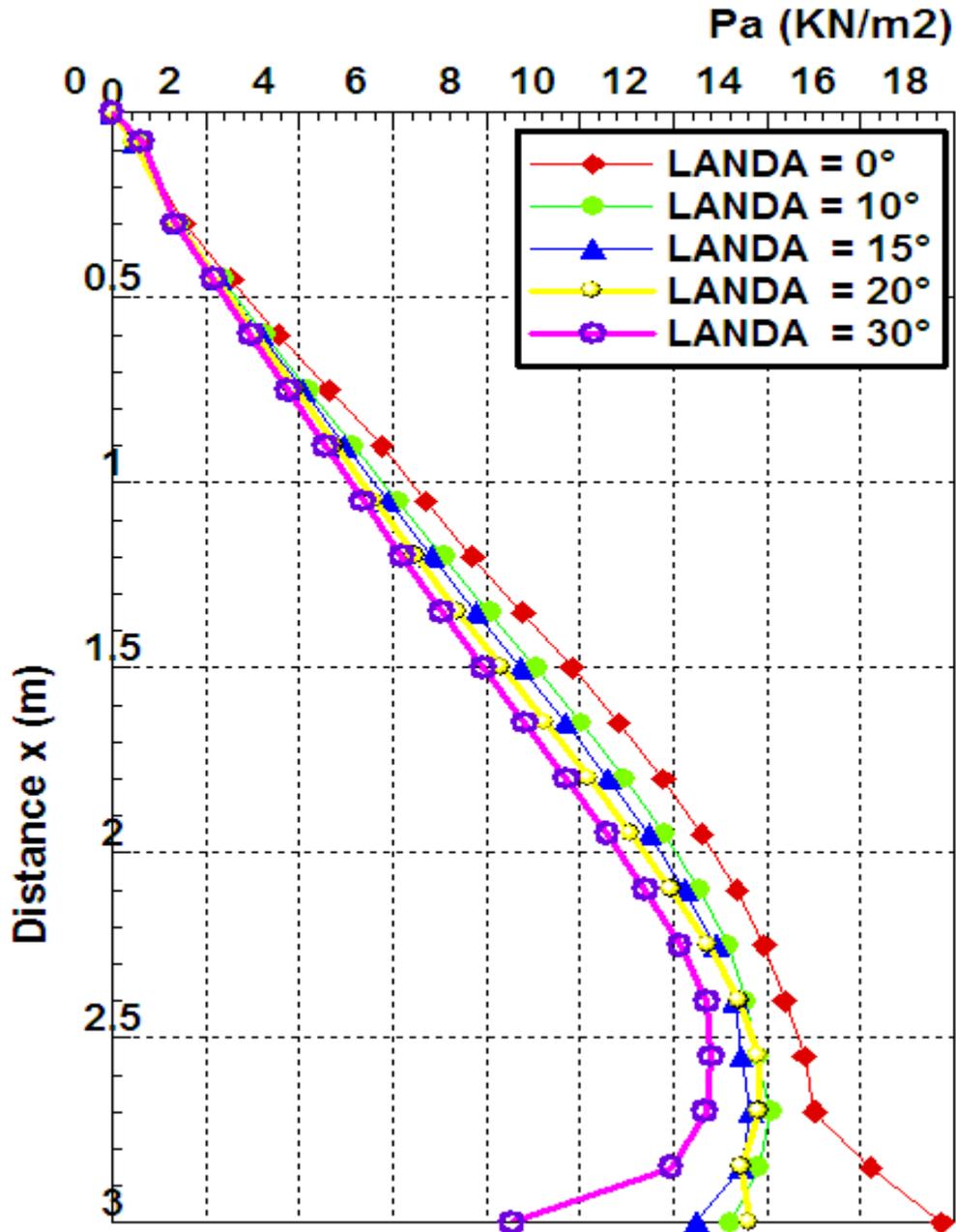


Figure 4-7b- Présente l'effet du changement de l'angle de l'interface Paroi-sol (δ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \phi = 30^\circ$
Cas de translation

4-1-4-2-1-2 Discussion :

- La figure 4-7a montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **translation horizontale** d'un écran rigide est triangulaire pour $\delta = 0^\circ$, lequel est conforme à la théorie de Rankine, avec un effet remarquable de l'augmentation de l'angle φ sur les pressions de terre, tant que φ augmente la pression active agissant sur le mur diminue.
- La figure 4-7b montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **translation horizontale** d'un écran rigide est triangulaire pour $\delta = 0^\circ$, au lequel est conforme a la théorie de Rankine. Il peut également être vu que la distribution de la pression active de terre change de triangulaire à non linéaire à la base de l'écran, tant que δ augmente, la pression active agissant sur le mur diminue.

4-1-4-2-2 Cas de rotation par rapport à la base :

La figure 4-8, montre la variation de la force horizontale active en fonction de la rotation par rapport à la base de l'écran rigide avec $\delta = 0$ et $\varphi = \psi = 40^\circ$.

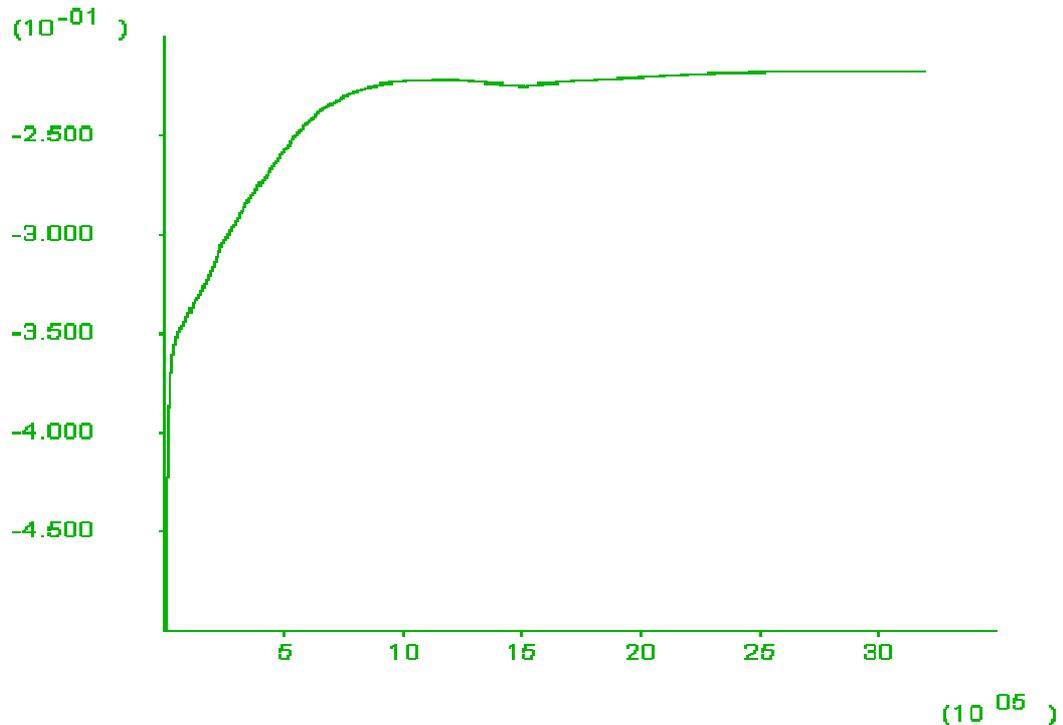


Figure 4-8- Montre la variation de la force horizontale active en fonction de la rotation par rapport à la base de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ et ($\varphi = \psi = 40^\circ$)

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-1) à (4-7) permet d'établir les observations suivantes :

- Les valeurs du coefficient actif de la terre K_a obtenues numériquement (FLAC 2D) sont très proches à celles de Bouali Meriem Fakhreddine avec une différence n'excédant pas 9.1% sauf en cas de $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$ on observe une différence importante.

4-1-4-2-2-1 Distribution de la pression active de la terre contre l'écran:

Les figures 4-9a, 4-9b, présentent le changement de la distribution de la pression normale active de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

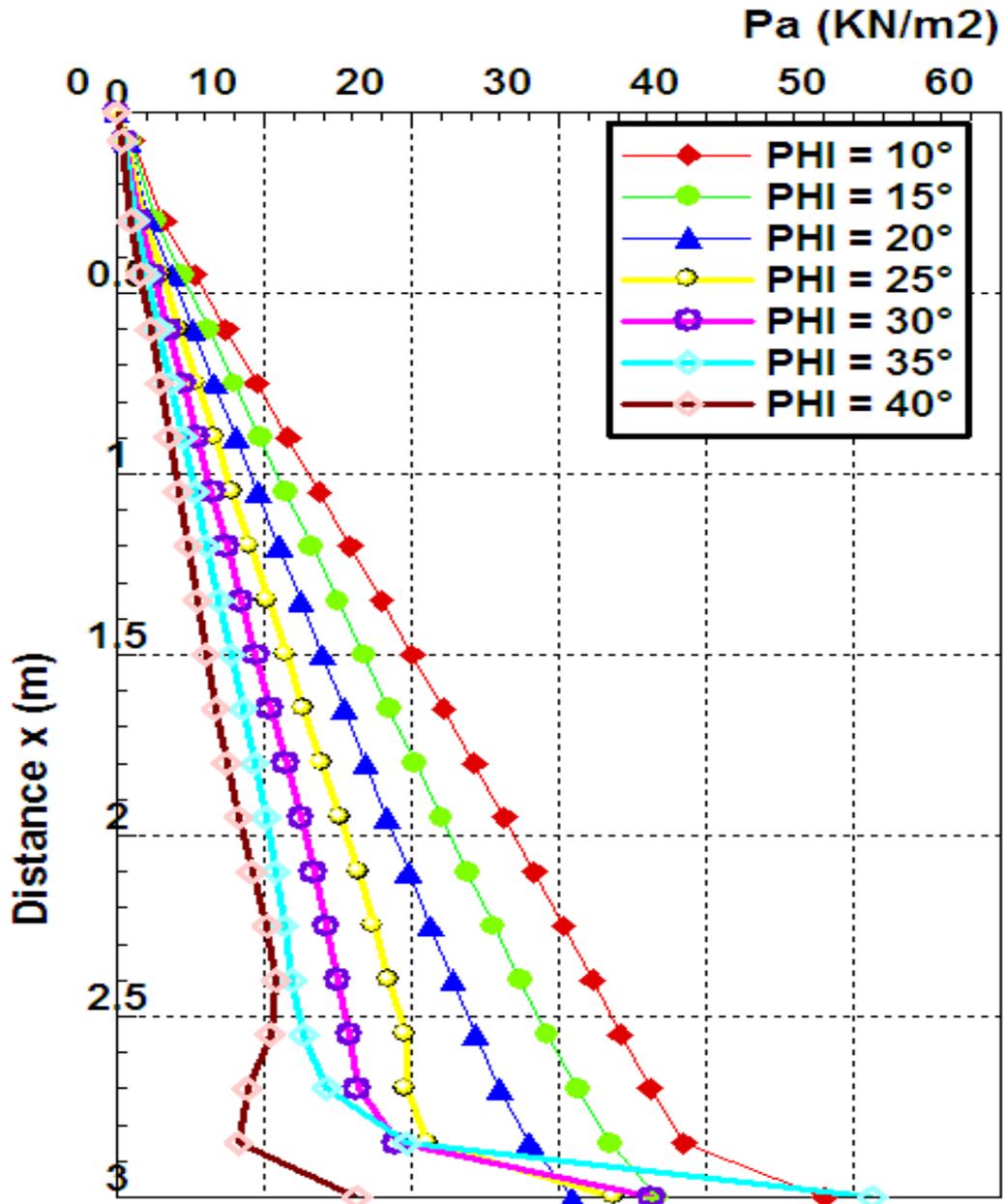


Figure 4-9a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol φ sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ et $\psi = \varphi$
Cas de rotation par rapport à la base

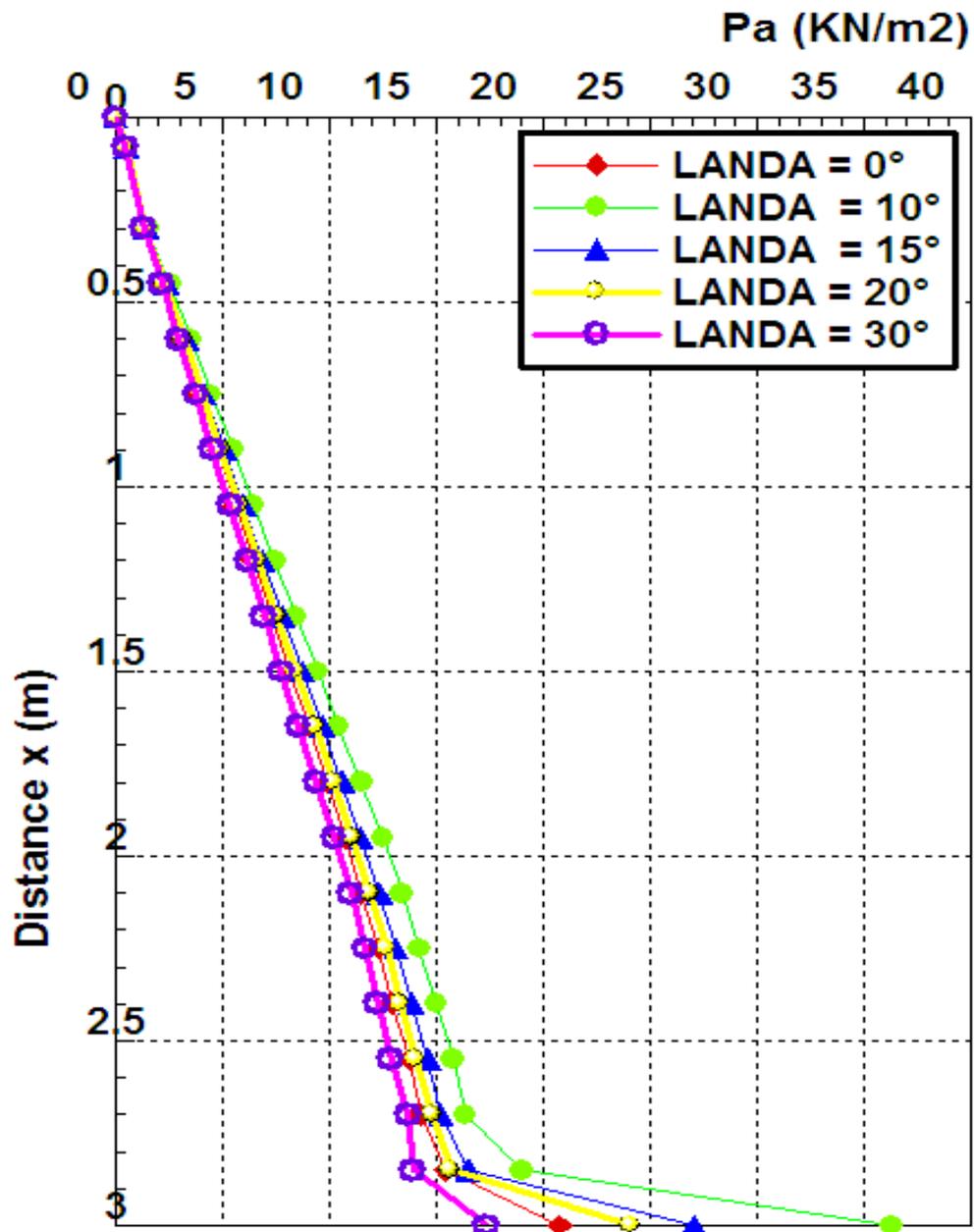


Figure 4-9b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Paroi-sol (δ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \phi = 30^\circ$
Cas de rotation par rapport à la base

4-1-4-2-2-2 Discussion :

- La figure 4-9a montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **rotation par rapport à la base** d'un écran rigide est

§ Parfaitement triangulaire si $\varphi \leq 20^\circ$

§ Triangulaire avec une augmentation brusque de la pression uniquement à la base proche du centre de rotation pour $\varphi > 20^\circ$

Un effet remarquable de l'augmentation de l'angle φ sur les pressions de terre, tant *que* φ augmente la pression active agissant sur le mur diminue.

- La figure 4-9b montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **rotation par rapport à la base** d'un écran rigide est linéaire avec une augmentation brusque de la pression uniquement à la base proche du centre de rotation, on note un effet très faible de l'augmentation de l'angle δ sur les pressions.

4-1-4-2-3 Cas de rotation par rapport au sommet :

La figure 4-10, montre la variation de la force horizontale active en fonction de la rotation par rapport au sommet de l'écran rigide et rugueux par rapport au sommet $\delta = \varphi = \psi = 20^\circ$.

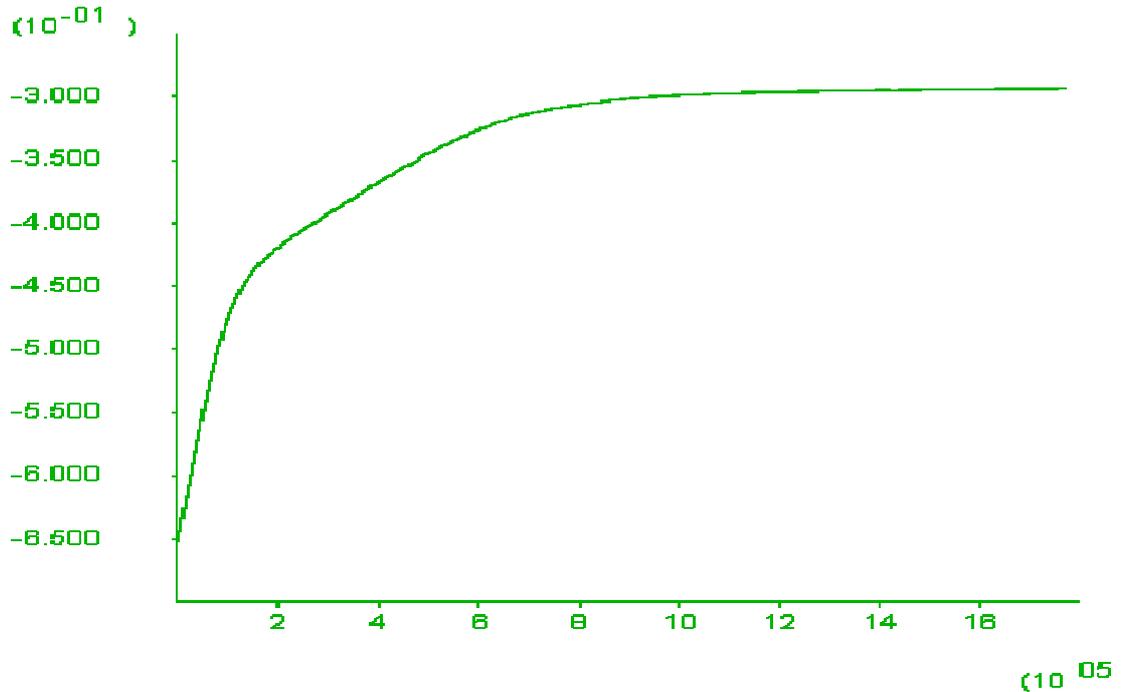


Figure 4-10- Montre la variation de la force horizontale active en fonction de la rotation par rapport au sommet de l'écran rigide et rugueux $\delta = \varphi = \psi = 20^\circ$

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-1) à (4-7) permet d'établir les observations suivantes :

- Les valeurs du coefficient actif de la terre K_a obtenues numériquement (FLAC 2D) sont très proches de celles de Bouali Meriem Fakhreddine avec une différence n'excédant pas 9.1% sauf $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$ on observe une grande différence.

4-1-4-2-3-1 Distribution de la pression active de terre contre l'écran :

Les figures 4-11a, 4-11b, présentent le changement de la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

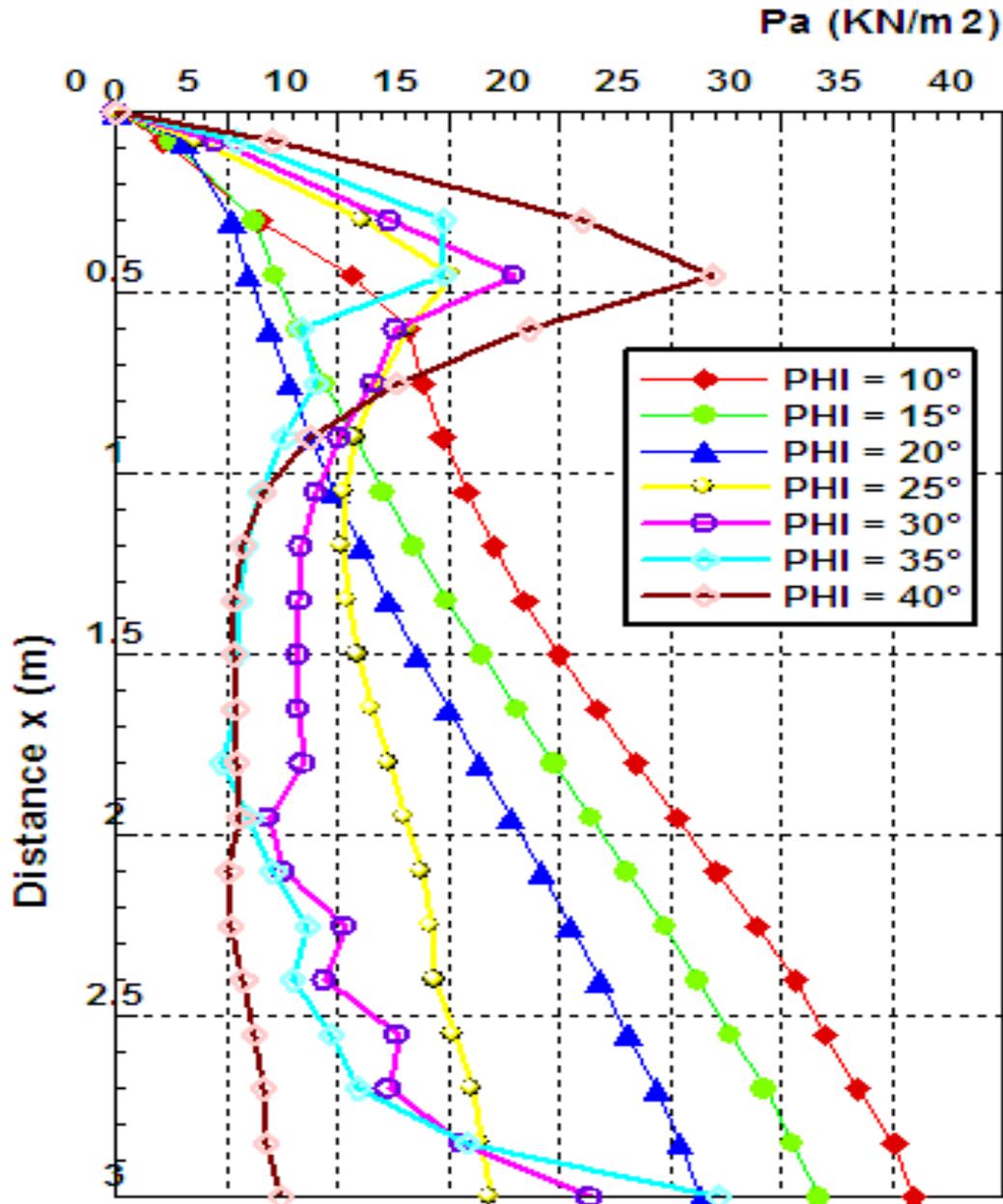


Figure 4-11a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran lisse $\delta = 0^\circ$ et rigide avec $\psi = \varphi$
Cas de rotation par rapport au sommet

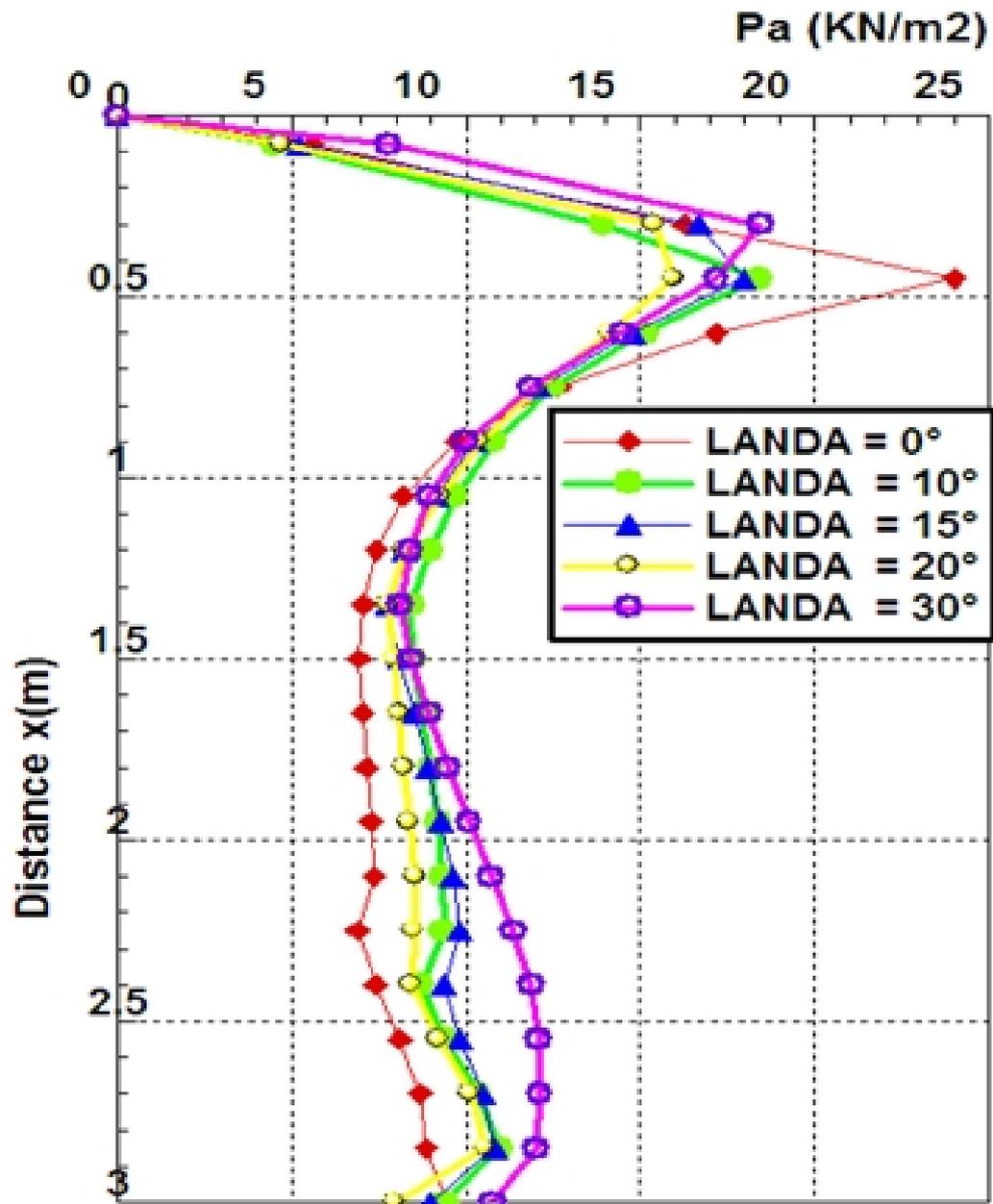


Figure 4-11b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Paroi-sol (δ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \varphi = 30^\circ$
Cas de rotation par rapport au sommet

4-1-4-2-3-2 Discussion :

- La figure 4-11a montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **rotation par rapport au sommet** d'un écran rigide est
 - § Légèrement triangulaire si $\varphi \leq 20^\circ$
 - § Non linéaire avec une concentration des contraintes au sommet de l'écran
- La figure 4-11b montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **rotation par rapport au sommet** d'un écran rigide est non linéaire avec une concentration des contraintes au sommet de l'écran

4-1-4-3 Pression passive de terre (K_p) :

Les différentes valeurs du coefficient passif de la terre K_p pour les différents modes de mouvement, présentées ci-dessus, sont regroupées dans les tableaux (4-8) à (4-14) pour des raisons de comparaison avec quatre solutions existantes de Coulomb-Rankine (1776), Caquot-Kérisel (1948), Soubra (2000), Soubra-Macuh (2002).

I-4-4-4 Évaluation de la pression passive (k_p) de la terre contre l'écran:

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux 4-8 à 4-14 permet d'établir les interprétations suivantes :

Les tableaux montrent l'augmentation du coefficient passif de la terre (K_p) quelle que soit le mode de mouvement avec :

- **L'augmentation de l'angle de frottement de sol φ** : quelque soient les valeurs des angles de frottement sol-paroi $\delta = (0, 1/2, 1/3, 2/3, 1) \varphi$ ou les valeurs des angles de dilataance du sol $\psi = (0, 1, 1/2) \varphi$.
- **L'augmentation de l'angle de frottement sol-paroi δ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement du sol φ ou les valeurs des angles de dilataance du sol $\psi = (0 ; 1 ; 1/2) \varphi$.
- **L'augmentation de l'angle de dilataance du sol ψ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement du sol φ ou les valeurs des angles de frottement sol-paroi $\delta = (0, 1/2, 1/3, 2/3, 1) \varphi$

Un effet plus significatif d'angle ψ sur la valeur du coefficient passif de la terre (K_p) uniquement pour les sols présentant un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$), et un angle de frottement paroi-sol $\delta = (20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ)$. Alors que son influence est pratiquement négligeable pour $\varphi = (10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ)$ et $\delta = (0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ)$.

On constate que l'effet de la variation de l'angle de frottement de l'interface paroi-sol δ sur le coefficient passif de la terre est décroissant uniquement pour les sols présentant un faible angle de frottement ($\varphi = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$) et $\delta = (0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ)$, et croissant pour les sols présentant un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 40^\circ$) et $\delta = 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ$.

L'effet de la variation de l'angle de frottement du sol φ sur le coefficient passif de la terre est décroissant.

L'effet de l'angle de frottement interne φ est plus significatif que les deux autres effets étudiés (effet de l'angle de frottement de l'interface paroi-sol δ et l'effet de l'angle de dilatance ψ) pour les trois modes de mouvement translation, rotation par rapport à la base et rotation par rapport au sommet.

Les valeurs données par Coulomb s'éloignent au-delà de $\varphi = 30^\circ$

4-1-4-5-1 Cas de translation :

La figure 4-12, montre la variation de la force horizontale passive en fonction de translation horizontale de l'écran rigide avec $\delta = 0^\circ$ et $\varphi = \psi = 35^\circ$.

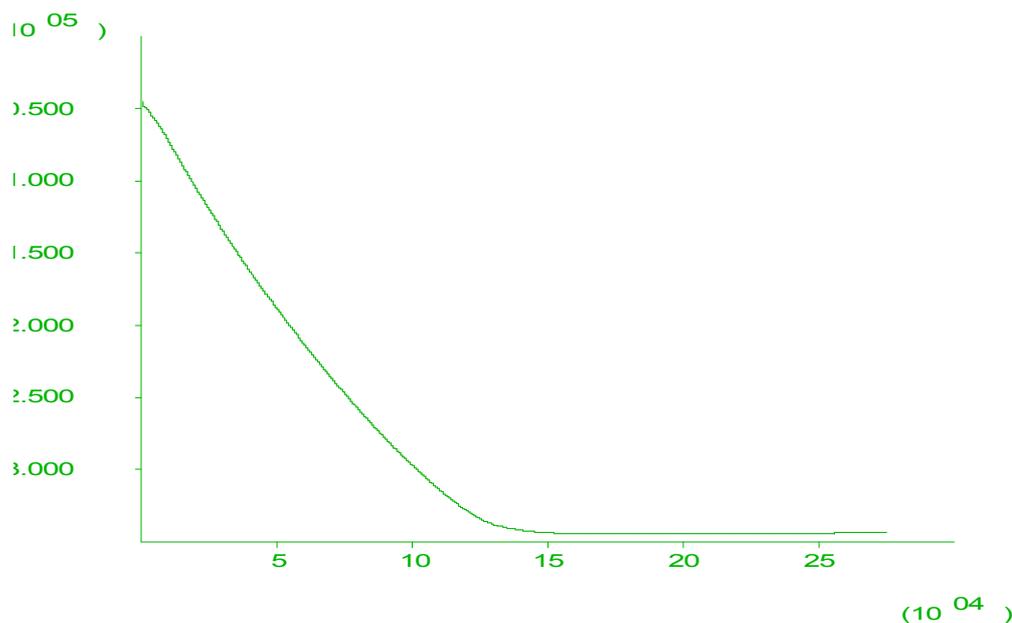


Figure 4-12- Montre la variation de la force horizontale passive en fonction du déplacement horizontal de l'écran rigide $\delta = 0^\circ$ et $(\varphi = \psi = 35^\circ)$

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-8) à (4-14) permet d'établir les observations suivantes :

- Les valeurs du coefficient passif de la terre K_p obtenues numériquement (FLAC 2D) **en cas de translation d'un écran lisse et rigide** sont en parfait accord avec les valeurs actuellement utilisées de Caquot-Kérisel quel que soit l'angle de frottement du sol φ .
- Les valeurs du coefficient passif de la terre K_p obtenues numériquement (FLAC 2D) **en cas de translation d'un écran rugueux et rigide** sont en parfait accord avec les valeurs actuellement utilisées de Caquot-Kérisel pour les sols présentant un faible angle de frottement $\varphi < 30^\circ$.
- Pour les sols présentant un fort angle de frottement $\varphi > 30^\circ$, les valeurs obtenues numériquement (FLAC 2D) pour le mode de translation horizontal d'écran d'un écran rugueux et rigide sont inférieures aux solutions données par Caquot-Kérisel mais elles ne sont pas très éloignées alors que la différence est remarquable avec les valeurs données par Coulomb-Rankine.

FLAC 2D présente une différence avec

Caquot-Kérisel n'excédant pas 18 % **pour. $\varphi = \psi = \delta = 40^\circ$**

Coulomb-Rankine n'excédant pas 82 % **pour. $\varphi = \psi = \delta = 40^\circ$**

- Lorsque $\varphi \leq 30^\circ$ les valeurs du coefficient passif de la terre K_p obtenues numériquement (FLAC 2D) pour le mode de translation horizontal d'écran sont en parfait accord avec les valeurs de Soubra et de Soubra-Macuh avec une différence n'excédant pas 6.49 % pour $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$ et lorsque $\varphi > 30^\circ$ sont inférieures bondissent des solutions de Soubra et de Soubra-Macuh de façon très remarquable.
- Pour le mode de mouvement (T), les résultats de simulation pour les différentes valeurs des angles (δ, φ, ψ) donnent des valeurs proches à celles de Bouali Meriem Fakhreddine FLAC 2D et présentent une différence n'excédant pas 2.70 % pour $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$

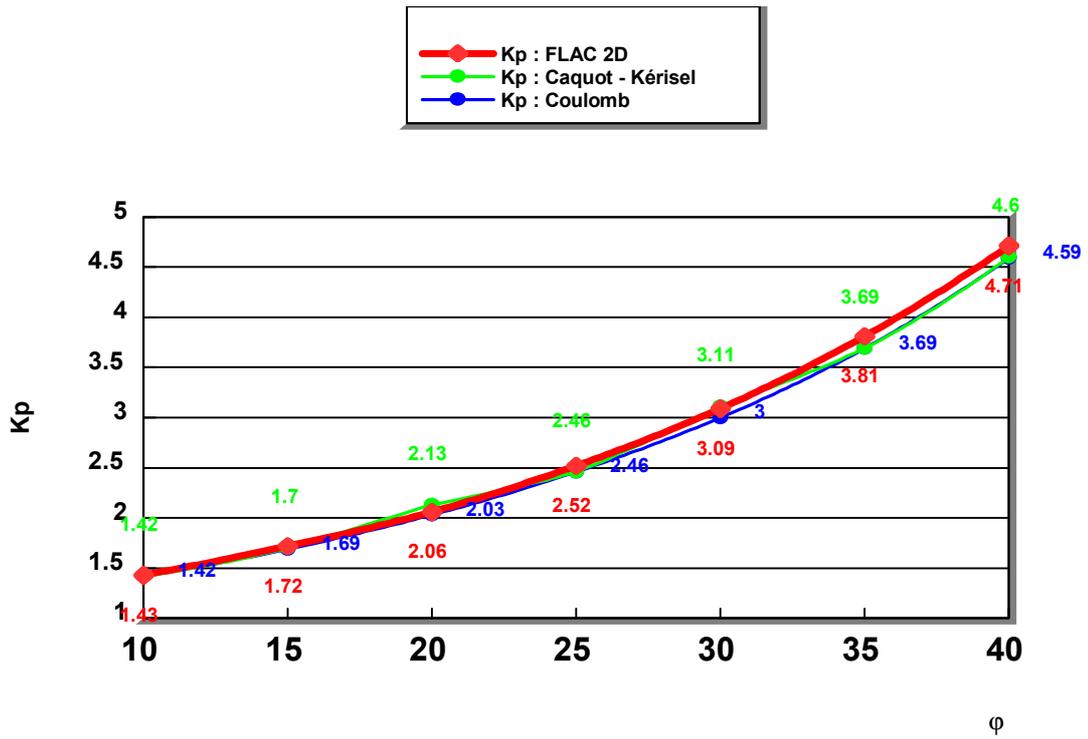


Figure 4-13a Cas de translation avec $\phi = \psi$, et $\delta = 0^\circ$

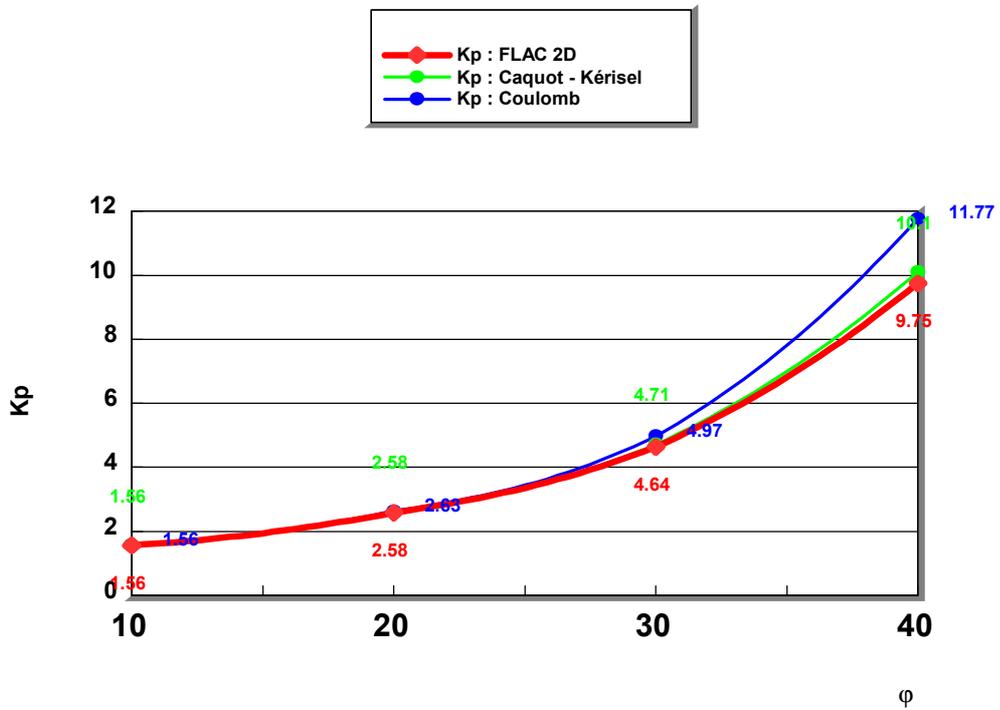


Figure 4-13b- Cas de translation avec $\phi = \psi$, et $\delta = 1/2 \phi$

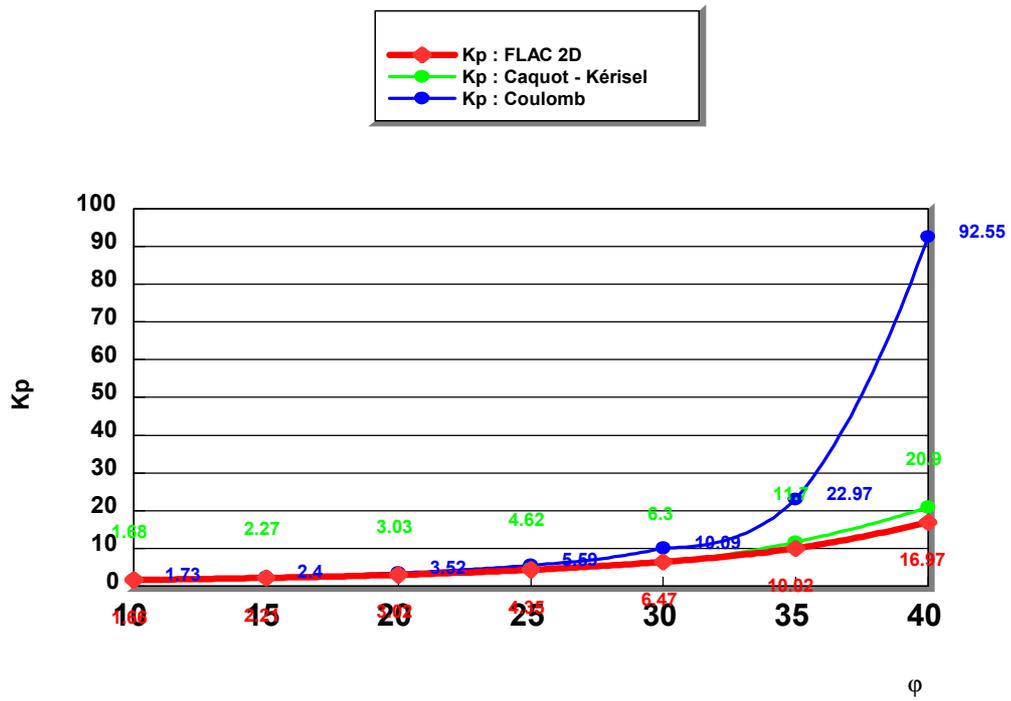


Figure 4-13c Cas de translation avec $\phi = \psi = \delta$

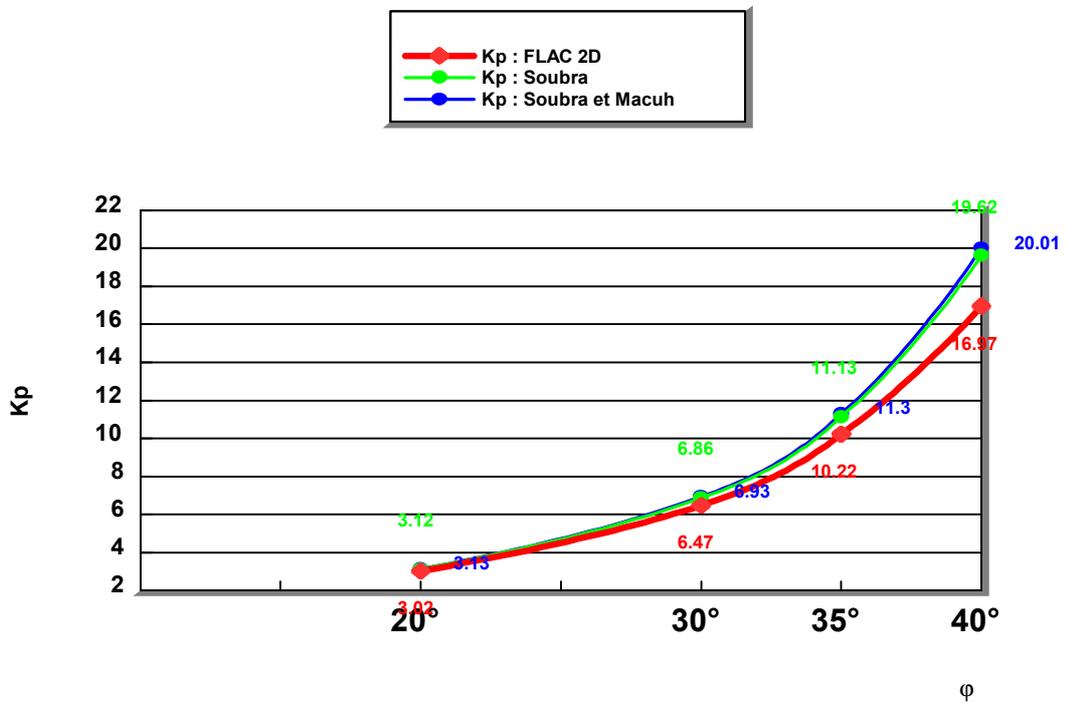


Figure 4-13d Cas de translation avec $\phi = \psi = \delta$

4-1-4-5-1-1 Distribution de la pression passive de terre contre l'écran :

Les figures 4-14a, 4-14b, présentent le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

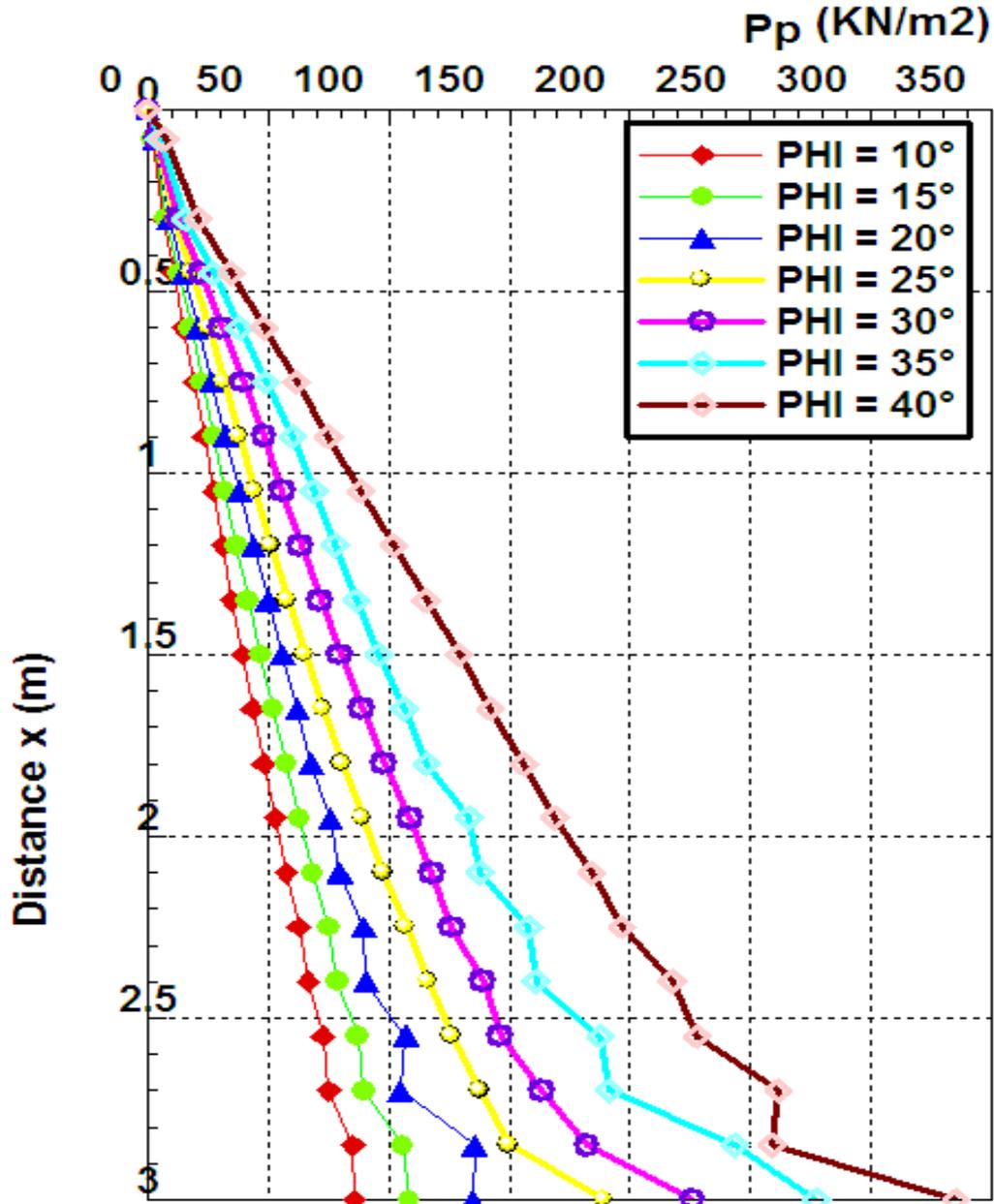


Figure 4-14a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \varphi$
Cas de translation

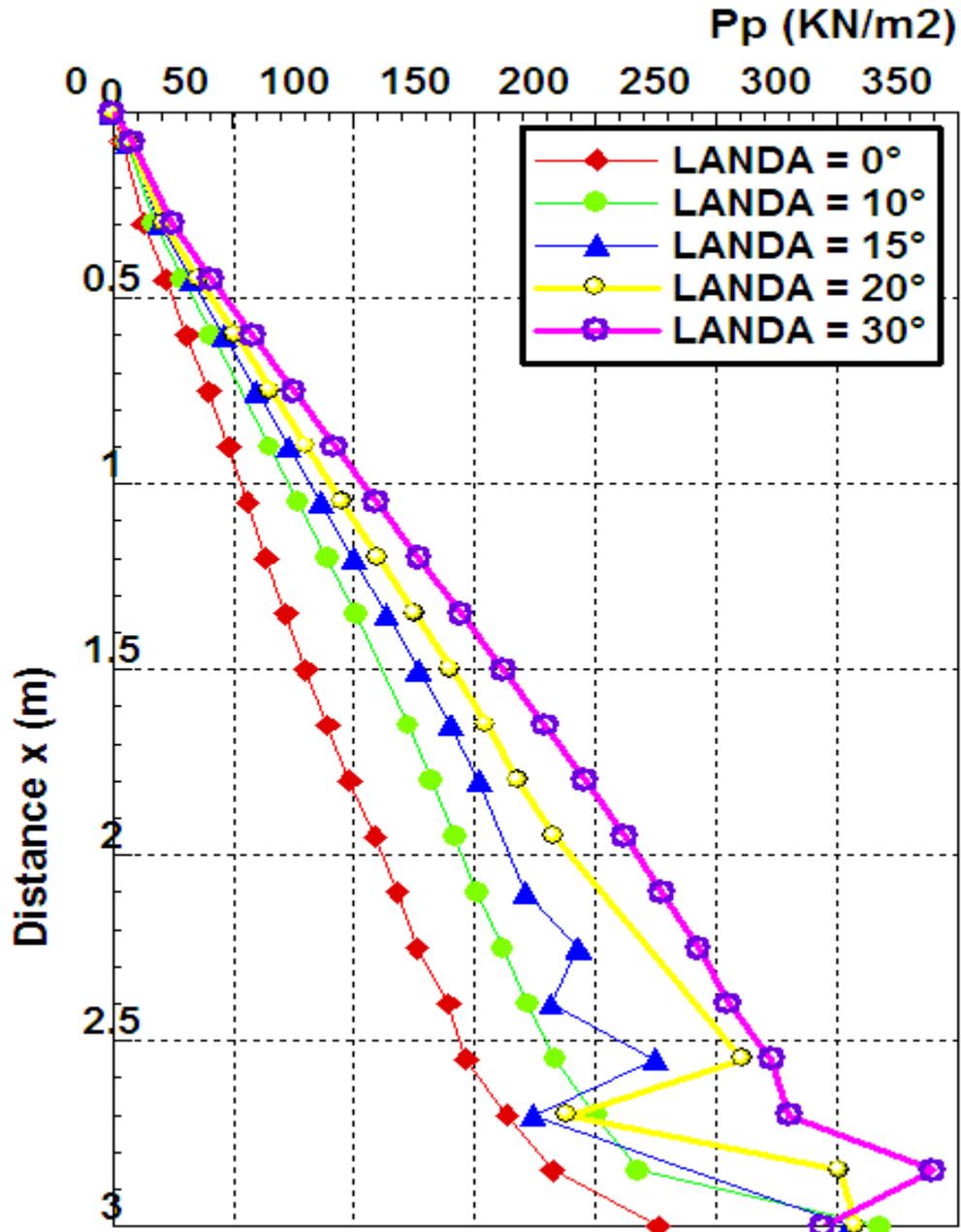


Figure 4-14b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Sol-paroi δ sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \phi = 30^\circ$
Cas de translation

4-1-5-1-2 Discussion :

- La figure 4-14a montre que la distribution des pressions passives pour la **translation horizontale** est linéaire, avec un effet remarquable de l'augmentation de l'angle φ sur les pressions de terre, tant que φ augmente la pression passive agissant sur le mur augmente.
- La figure 4-14b montre que la distribution des pressions passive pour la **translation horizontale** est linéaire sauf une courbure observée près de la base d'écran, avec un effet remarquable de l'augmentation de l'angle δ sur les pressions de terre, tant que δ augmente la pression passive agissant sur le mur augmente.

4-1-4-5-2 Cas de rotation par rapport à la base :

La figure 4-15, montre la variation de la force horizontale passive en fonction de la rotation par rapport à la base de l'écran rigide avec $\delta = 0^\circ$, et $\varphi = \psi = 35^\circ$.

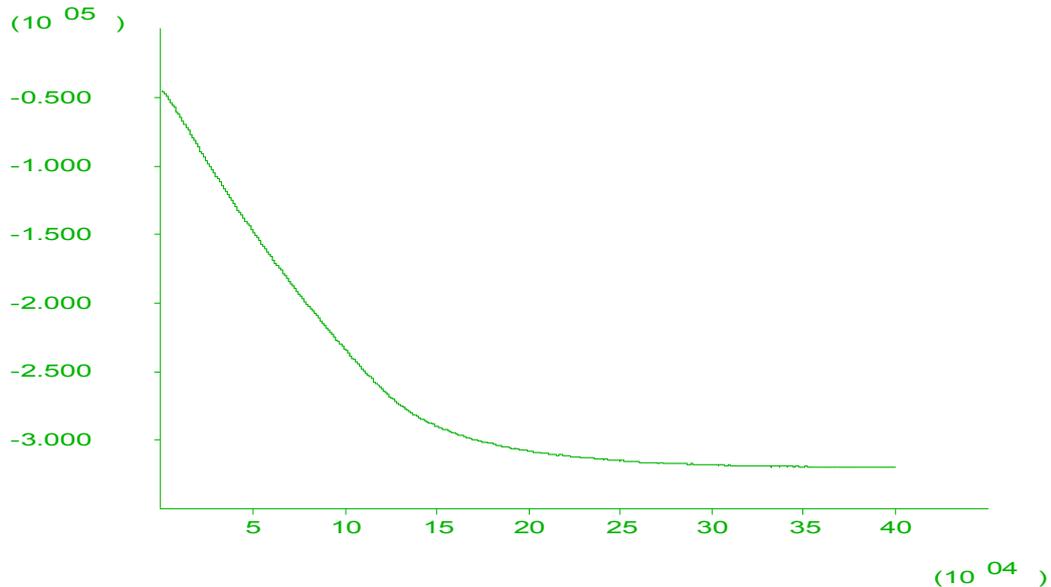


Figure 4-15- Montre la variation de la force horizontale passive en fonction de rotation par rapport à la base de l'écran rigide $\delta = 0^\circ$, et ($\varphi = \psi = 35^\circ$)

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-8) à (4-14) permet d'établir les observations suivantes :

- Pour le mode de mouvement **(RB)**, les résultats de simulation pour les différentes valeurs des angles (δ, φ, ψ) donnent des valeurs proches de celles de Bouali Meriem Fakhreddine FLAC 2D et présentent une différence n'excédant pas 4.37 % pour $\psi = 30^\circ$ et $\delta = 0^\circ$

I-4-4-5-2-1 Distribution de la pression passive de terre contre l'écran :

Les figures 4-16a, 4-16b, présentent le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

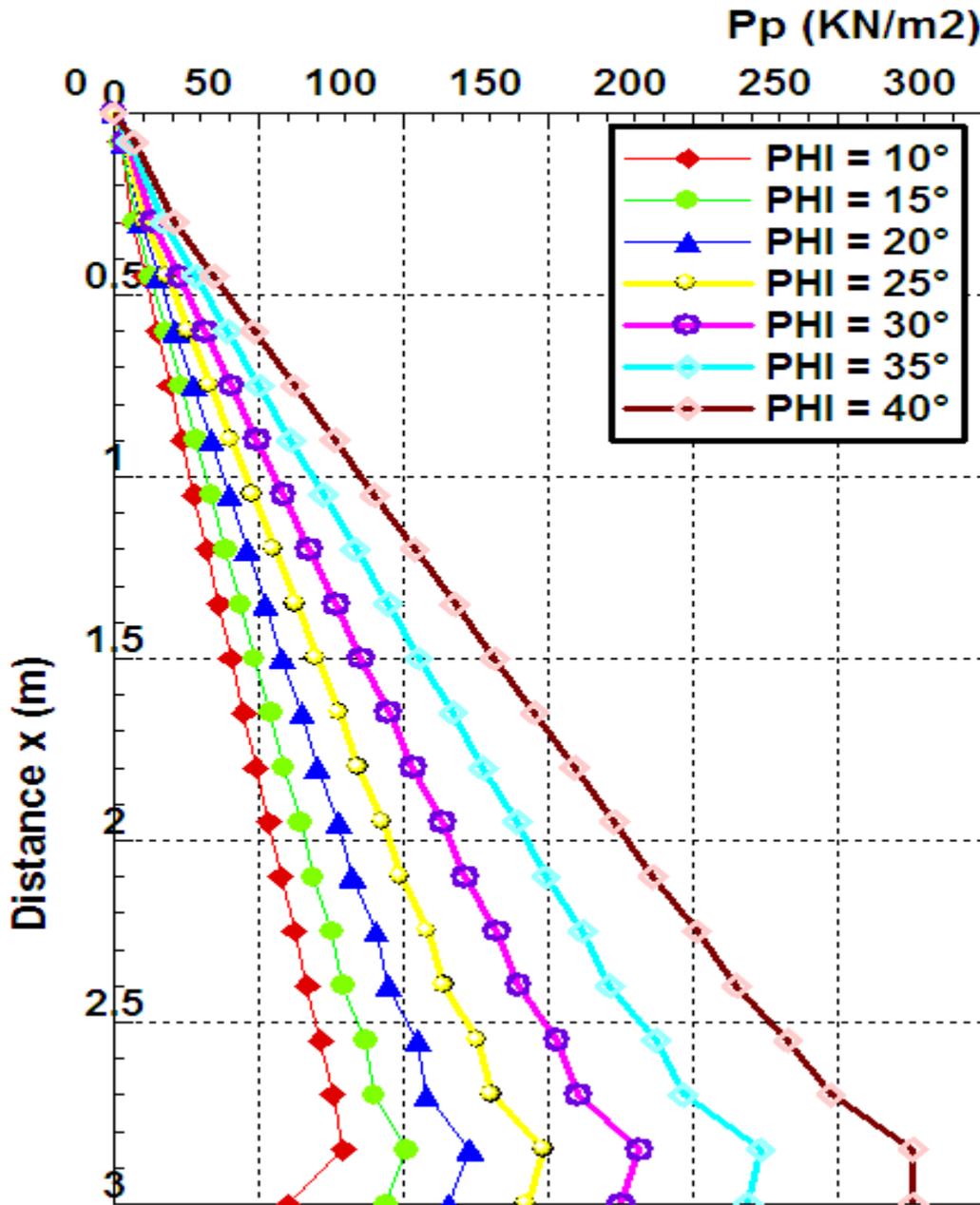


Figure 4-16a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \varphi$
Cas de rotation par rapport à la base

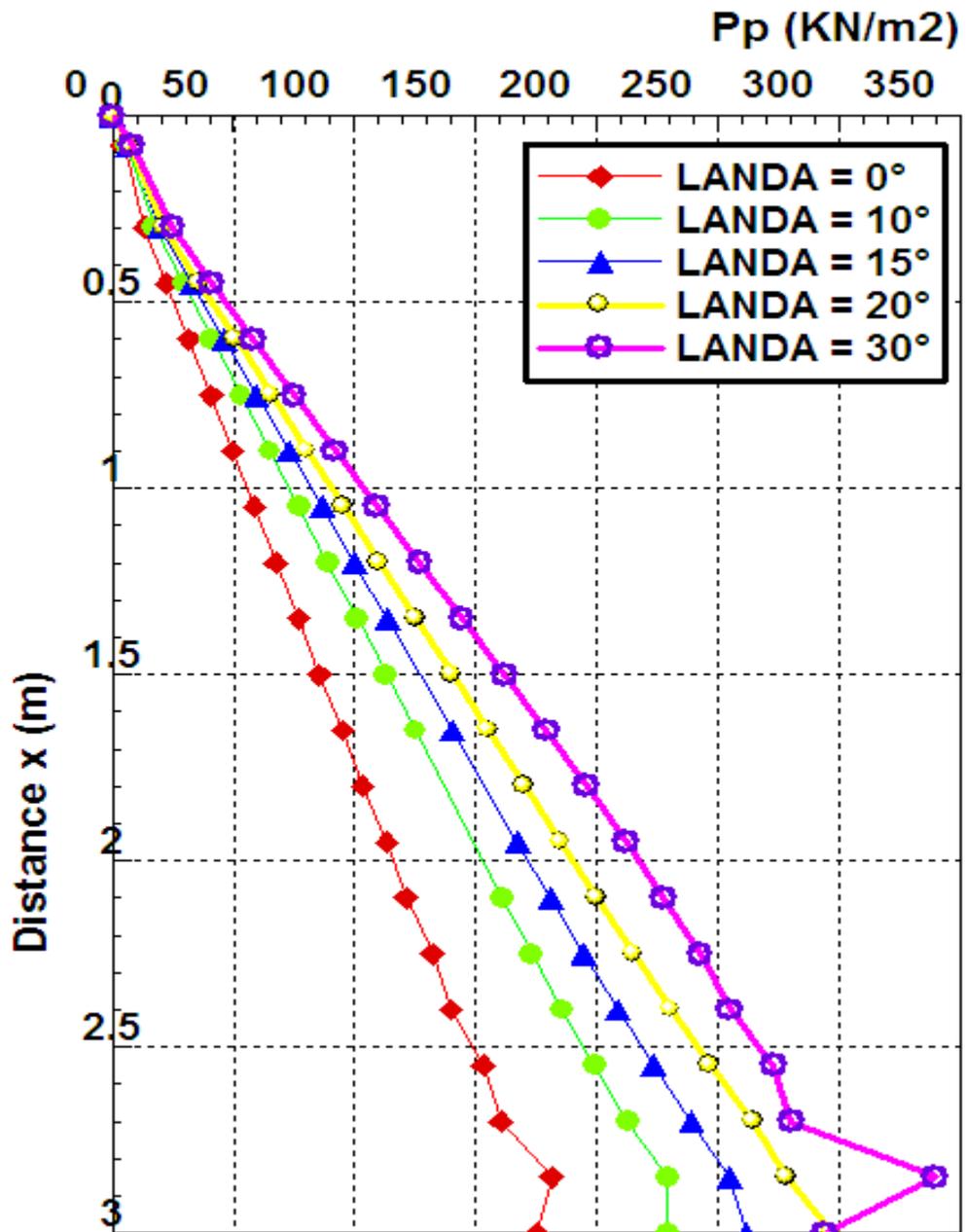


Figure 4-16b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Sol-paroi δ sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ Cas de rotation par rapport à la base

4-1-4-5-2-2 Discussion :

- La figure 4-16a montre que la distribution des pressions passives est linéaire avec un effet remarquable de l'augmentation de l'angle φ sur les pressions de terre, tant que φ augmente la pression passive agissant sur le mur augmente.
- La figure 4-16b montre que la distribution des pressions passive est linéaire avec un effet de l'augmentation de l'angle δ sur les pressions de terre, tant que δ augmente la pression passive agissant sur le mur augmente.

4-1-4-5-3 Cas de rotation par rapport au sommet ;

La figure 4-17, montre la variation de la force horizontale passive en fonction de rotation par rapport au sommet de l'écran rigide avec $\delta = 0^\circ$, $\varphi = \psi = 35^\circ$.

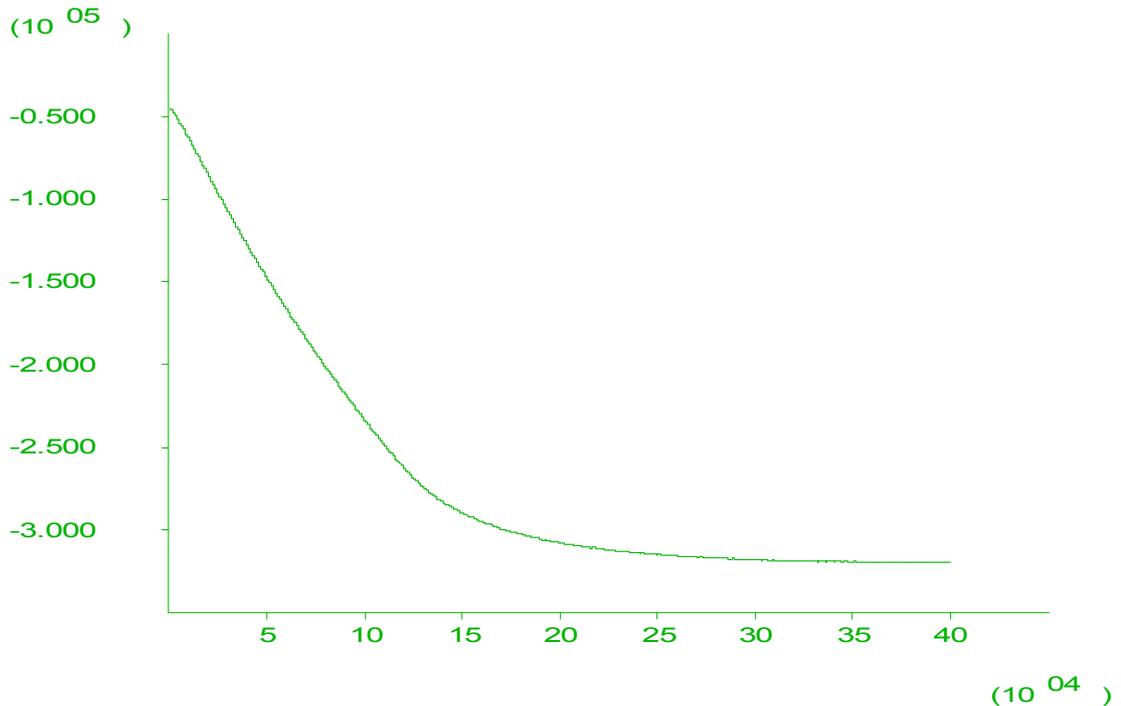


Figure 4-17- Montre la variation de la force horizontale passive en fonction de la rotation par rapport au sommet de l'écran rigide $\delta = 0^\circ$, $\varphi = \psi = 35^\circ$

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-8) à (4-14) permet d'établir les observations suivantes :

- Pour le mode de mouvement (**RS**), les résultats de simulation pour les différentes valeurs des angles (**δ , φ , ψ**) donnent des valeurs proches de celles de Bouali Meriem Fakhreddine. FLAC 2D est présentement une différence n'excédant pas 6.52 % pour $\varphi = \psi = 30^\circ$ et $\delta = 0^\circ$

4-1-4-5-3-1 Distribution de la pression passive de terre contre l'écran :

Les figures 4-18a, 4-18b, présentent le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

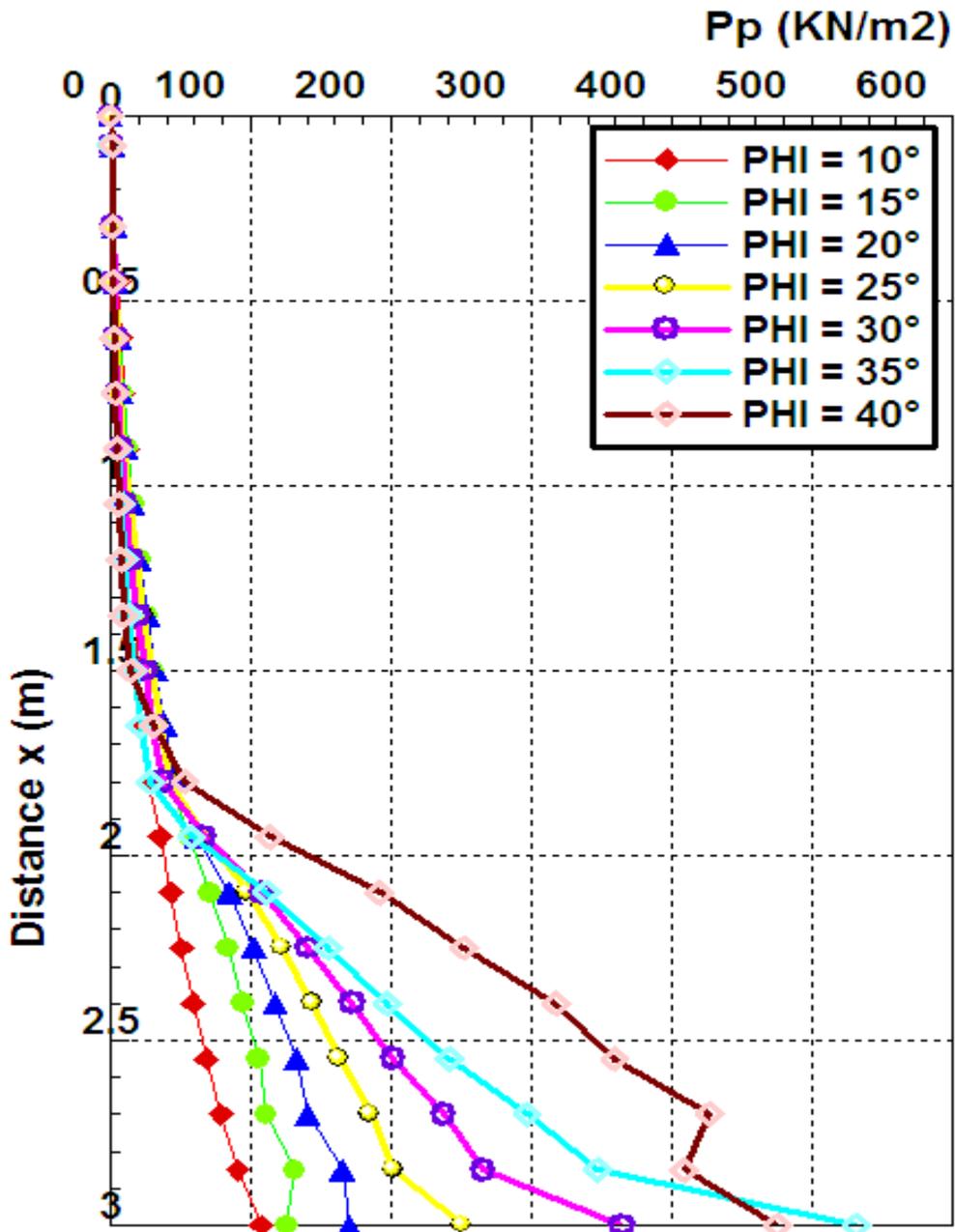


Figure 4-18a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \varphi$
Cas de rotation par rapport au sommet

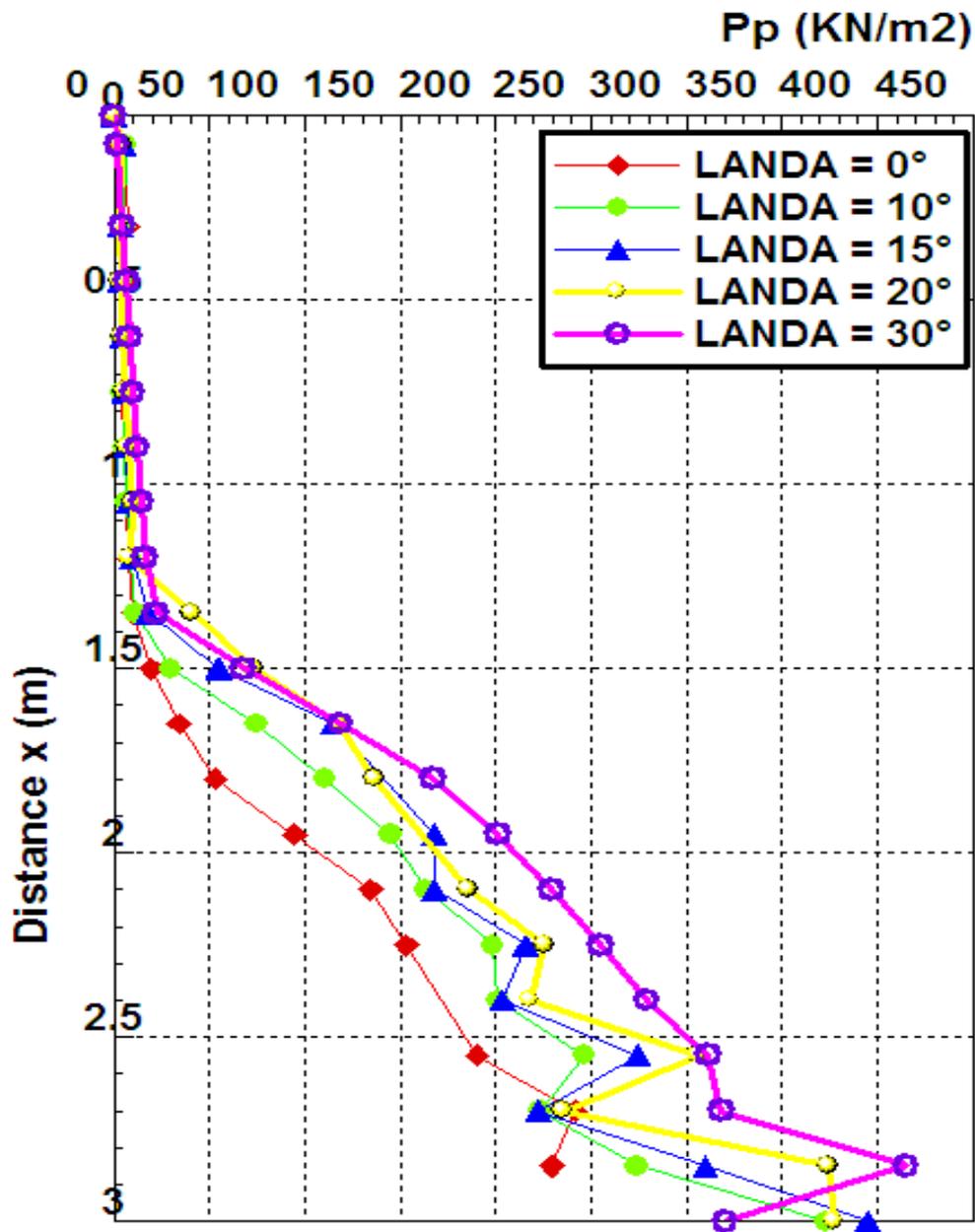


Figure 4-18b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Sol-paroi δ sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \phi = 30^\circ$
Cas de rotation par rapport au sommet

4-1-4-5-3-2 Discussion :

- Les deux figures 4-18a et 4-18b montrent que dans le cas de **rotation par rapport au sommet** la butée présente un état de pression au repos sur moins de 50% de la hauteur de l'écran comptée à partir du sommet.

4-1-5 Comparaison entre les trois modes étudiés (T, RB, RS):

4-1-5-1 Les zones mobilisées par la butée et la poussée :

Afin de visualiser la zone mobilisée par la butée et la poussée, nous présentons sur les figures 4-19a, 4-19b, 4-19c, les champs de déplacements maximaux pour les trois modes de mouvement T, RB, RS respectivement avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ et $\delta = 0^\circ$.

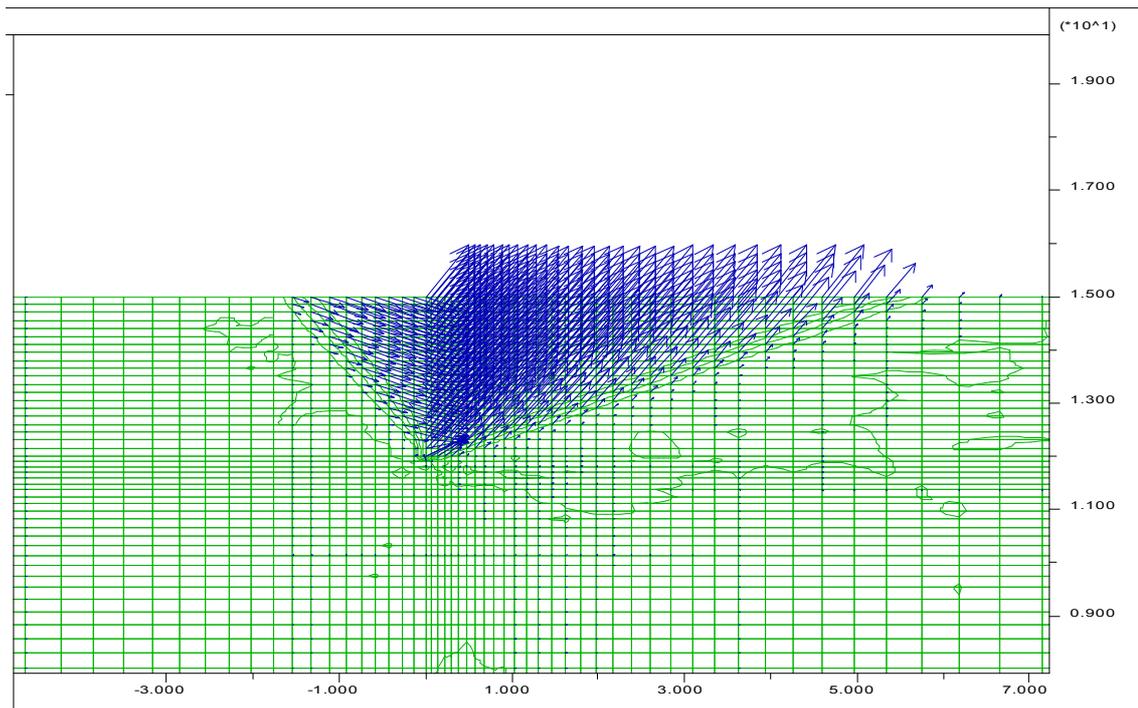


Figure 4-19a- Montre le champ de déplacement maximal pour le mode de translation

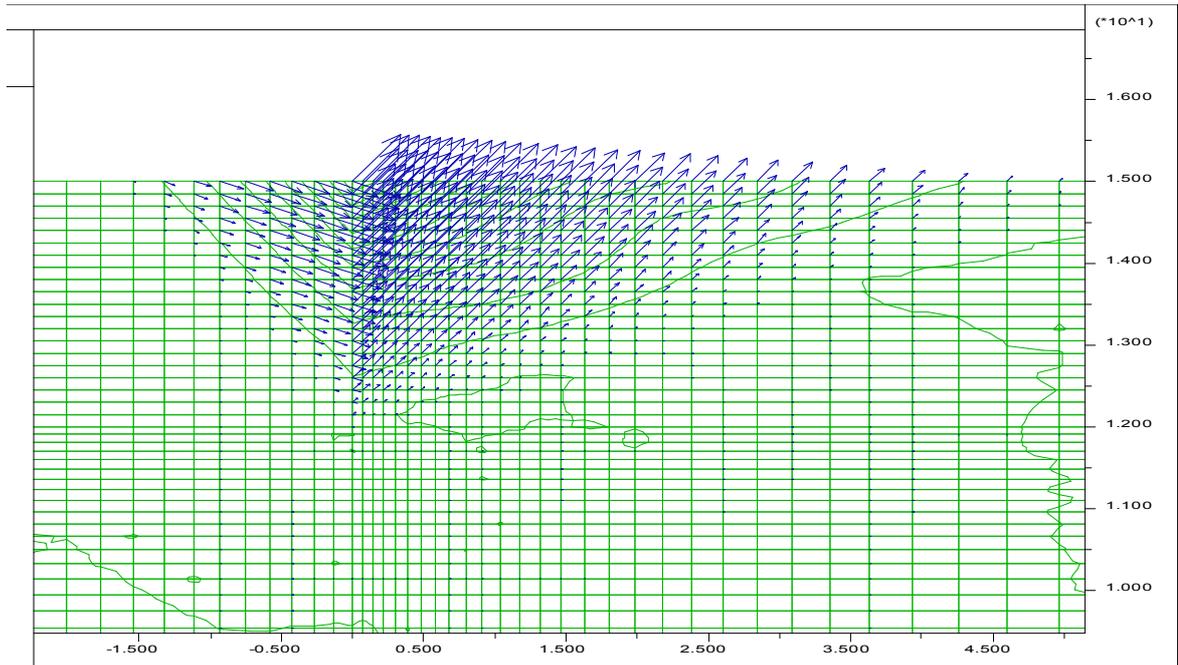


Figure 4-19b- Montre le champ de déplacement maximal pour le mode de rotation par rapport à la base

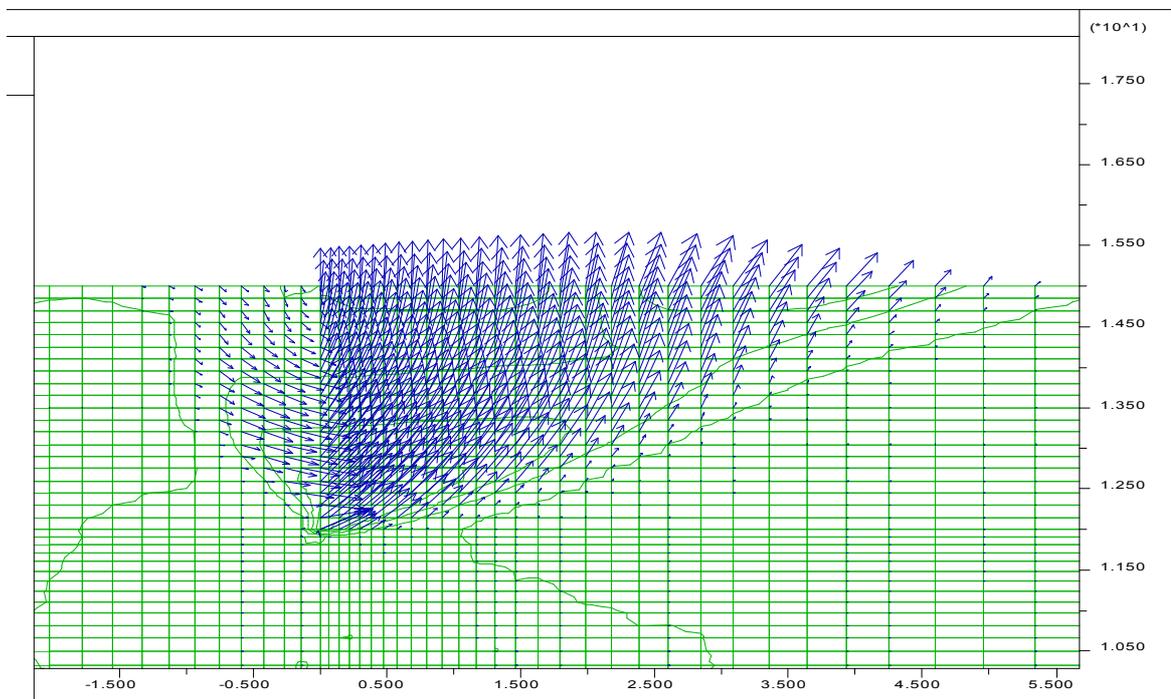


Figure 4-19c- Montre le champ de déplacement maximal pour le mode de rotation par rapport au sommet

4-1-5-2 Les zones plastifiées par la butée et la poussée :

Afin de visualiser la zone plastifiées par la butée et la poussée, nous présentons sur les figures 4-20a, 4-20b, 4-20c, les zone plastifiées pour les trois modes de mouvement T, RB, RS respectivement avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ et $\delta = 0^\circ$.

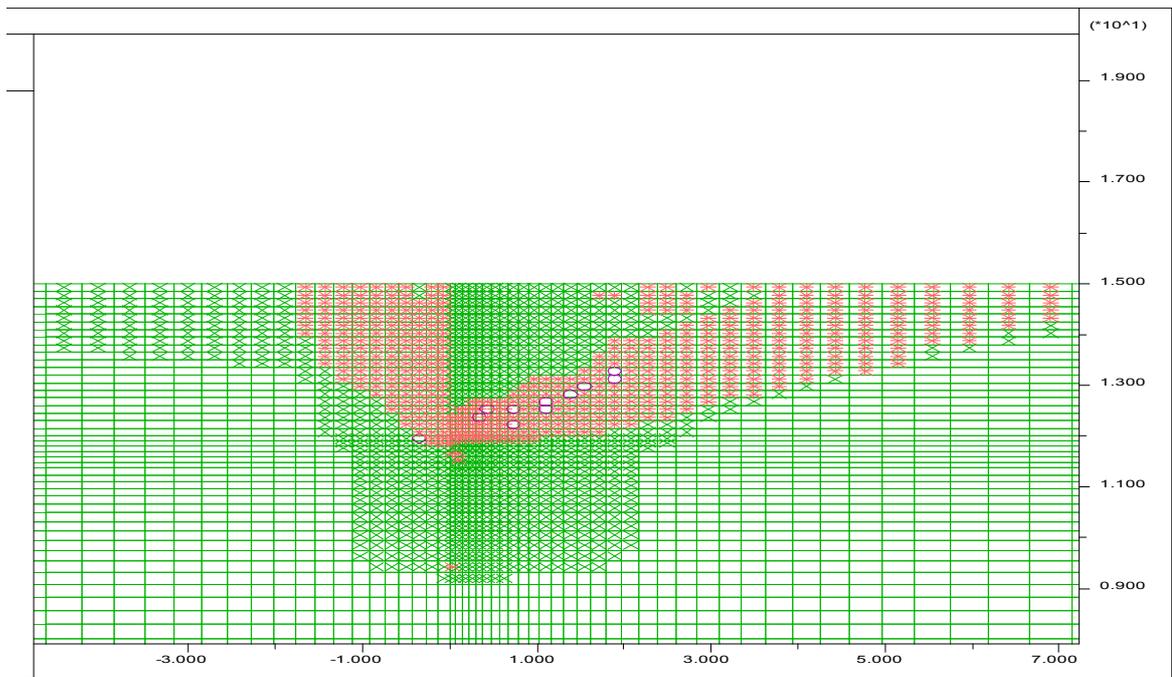


Figure 4-20c- Montre la zone plastifiée par la poussée et la butée pour le mode de translation

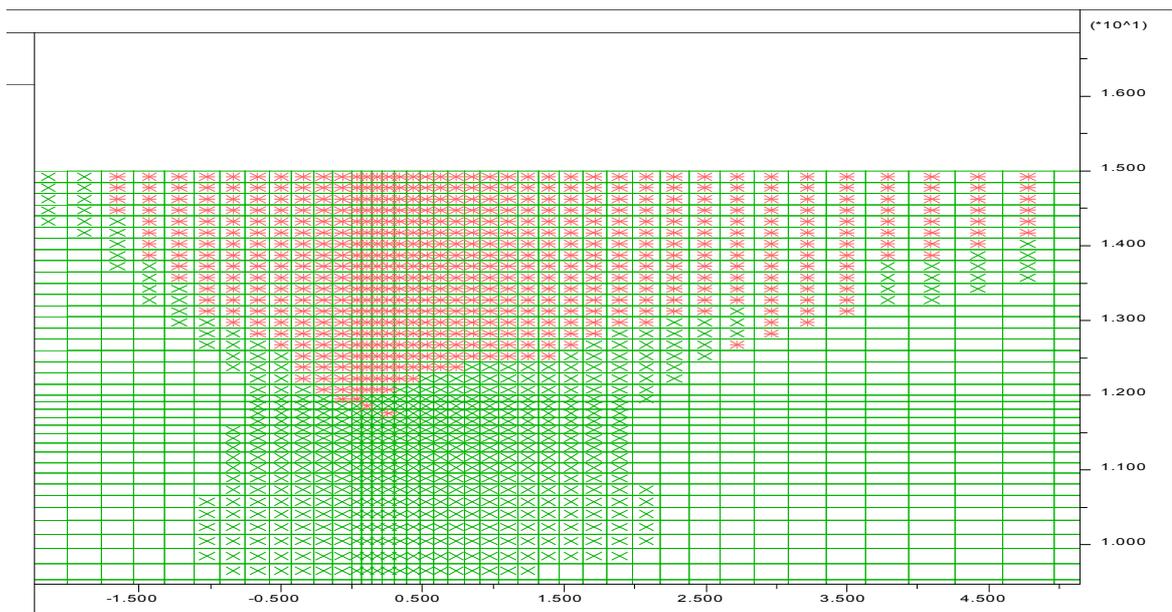


Figure 4-20b- Montre la zone plastifiée par la poussée et la butée pour le mode de rotation par rapport à la base

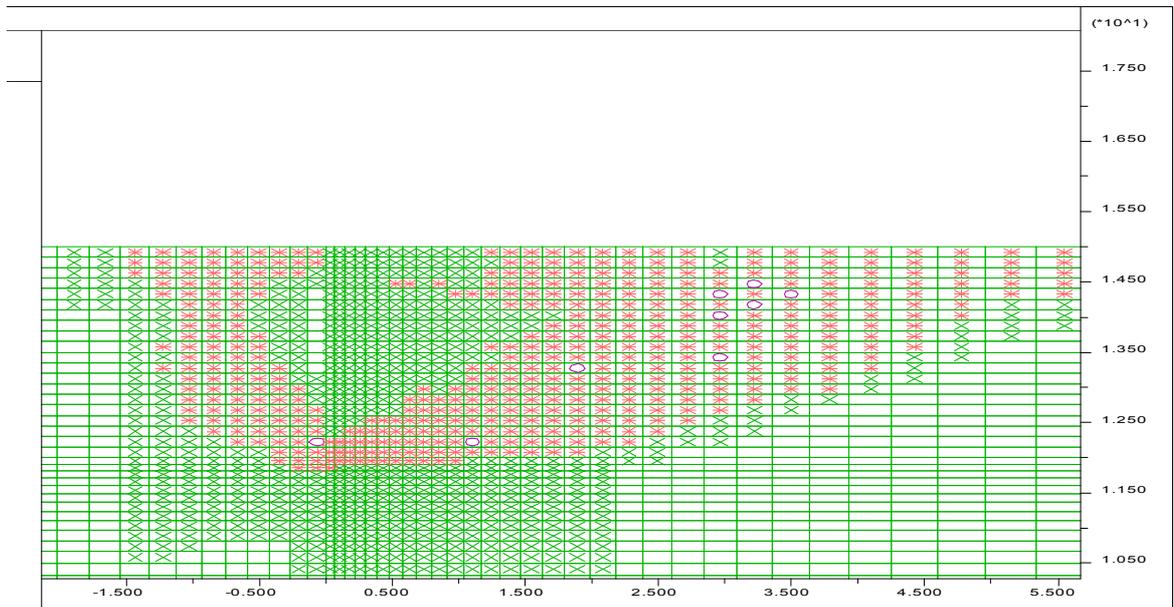


Figure 4-20c- Montre la zone plastifiée par la poussée et la butée pour le mode de rotation par rapport au sommet

4-1-5-3 discussion :

Les figures 4-19a, 4-19b et 4-19c montrent pour $\delta = 0^\circ$ avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ la visualisation du champ de déplacement pour trois modes de mouvements (**T**, **RB**, **RS**) respectivement.

Ces figures montrent clairement les zones mobilisées par la butée et la poussée visualisées par la concentration des vecteurs de déplacements, la surface de rupture est similaire à la surface plane proposée par Rankine délimitant un prisme triangulaire.

4-1-5-4 Coefficient de poussée K_a :

L'analyse des résultats de simulation présentés dans le tableau (4-1) à (4-7) permet d'établir les interprétations suivantes :

- Le mode T (translation) possède le plus faible coefficient de pression active, ensuite vient le mode RB (rotation par rapport à la base) et RS (rotation par rapport au sommet) qui possède le plus grand coefficient de pression active.
- On peut observer que lorsque $\psi = \delta = 0$ les valeurs de coefficient actif de la terre K_a de mode de translation sont très proches aux valeurs de mode de rotation par rapport à la base de l'écran quelles que soient les valeurs de φ .
- La translation (T) et la rotation par rapport à la base (RB) qui ont presque les mêmes coefficients (l'écart ne dépasse pas 7%).
- L'égalité des coefficients des terres actifs des modes T (translation) et rotation par rapport à la base (RB) peut être justifiée par la même nature de distribution des pressions.
- La rotation par rapport au sommet (RS) possède le plus grand K_a (la différence maximale entre K_a de RS et celui de T est de l'ordre de 58% dans le cas où $\varphi = 40^\circ$, $\delta/\varphi = 0^\circ$ et $\psi = 0$).
- On observe que l'influence du mode de mouvement de translation sur l'évaluation de coefficients de pression active de terre a presque le même effet avec que le mode de mouvement de rotation par rapport à la base en cas de la variation de l'angle de frottement interne du sol φ .
- On observe que l'influence du mode de mouvement de translation sur l'évaluation de coefficients de pression active de terre a presque le même effet avec le mode de mouvement de rotation par rapport à la base en cas de la variation de l'angle de frottement de l'interface paroi-sol δ de (0° à φ) et avec $\psi = \varphi$.
- Le mode de mouvement de translation est plus critique que les deux autres modes de mouvements étudiés (RS. RB) respectivement.

4-1-5-4-1 Cas de la distribution de pression active de la terre contre l'écran:

Les figures 4-21a, 4-21b, présentent le changement de la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ en fonction du changement du mode de mouvements (T, RB, RS) avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ et 40° respectivement.

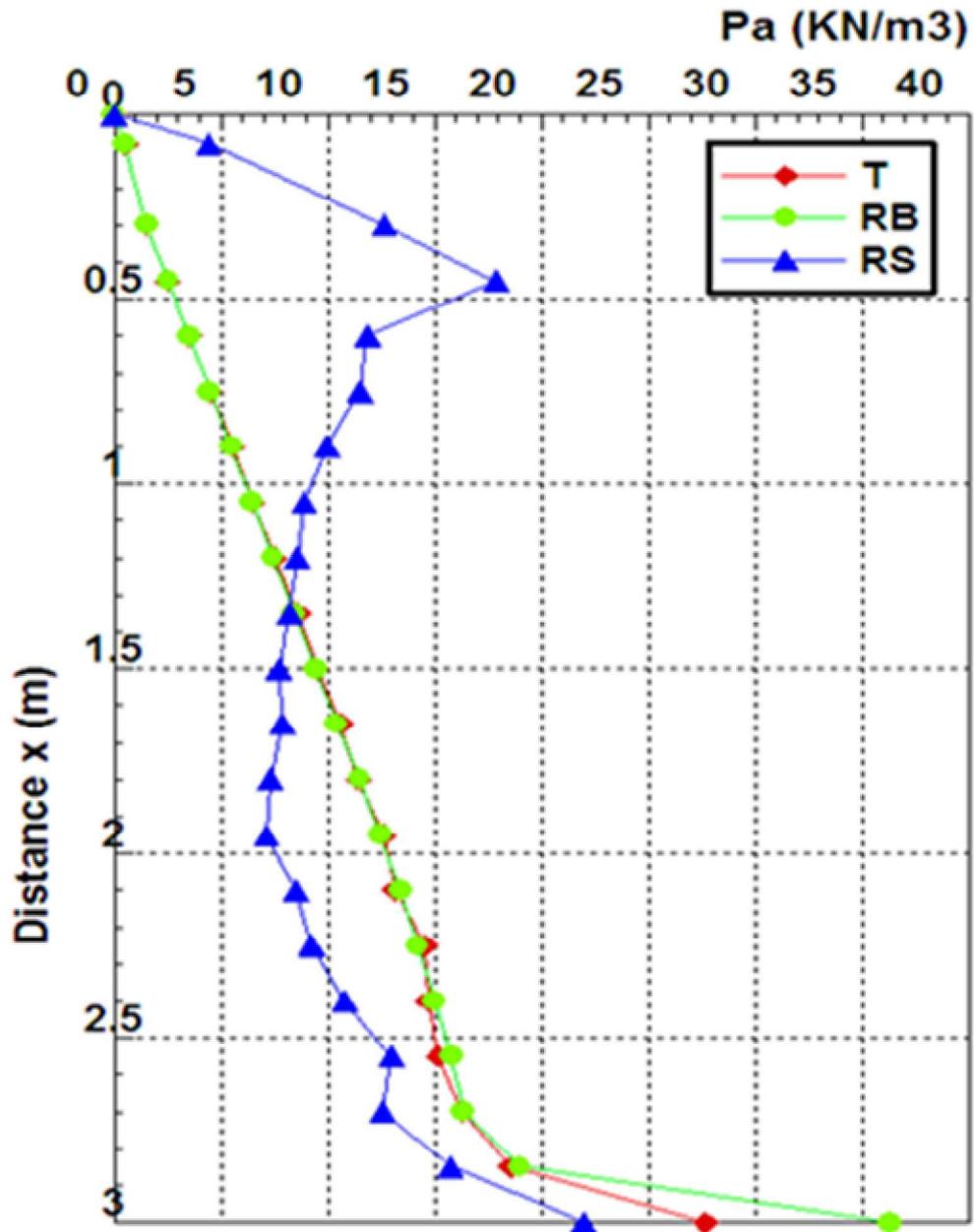


Figure 4-21a- Cas de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$

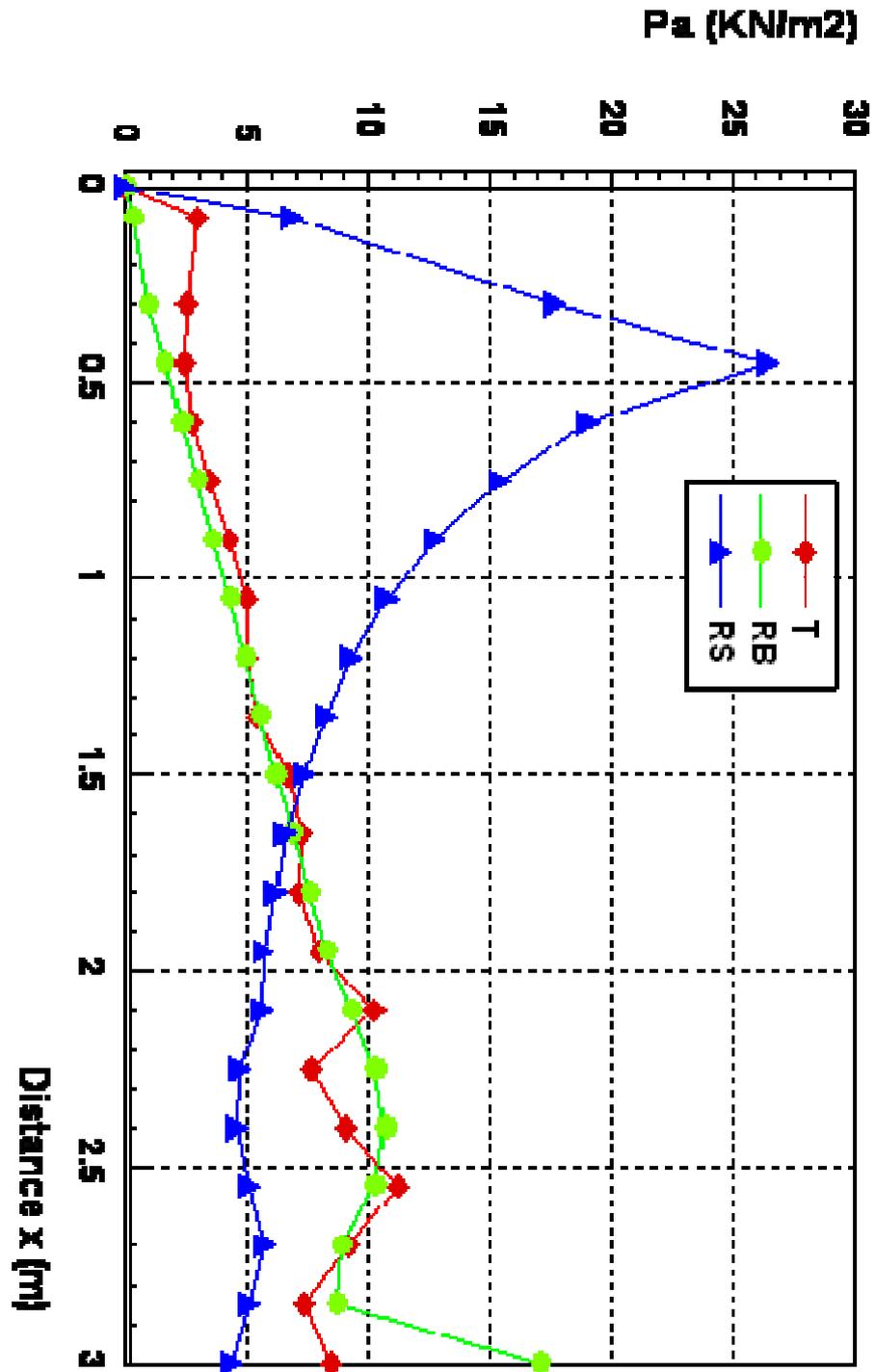


Figure 4-21b - Cas de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \phi = 40^\circ$

La figures 4-22, présente le changement de la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide et rugueux $\delta = \varphi = \psi = 30^\circ$ en fonction du changement du mode de mouvements (T, RB, RS).

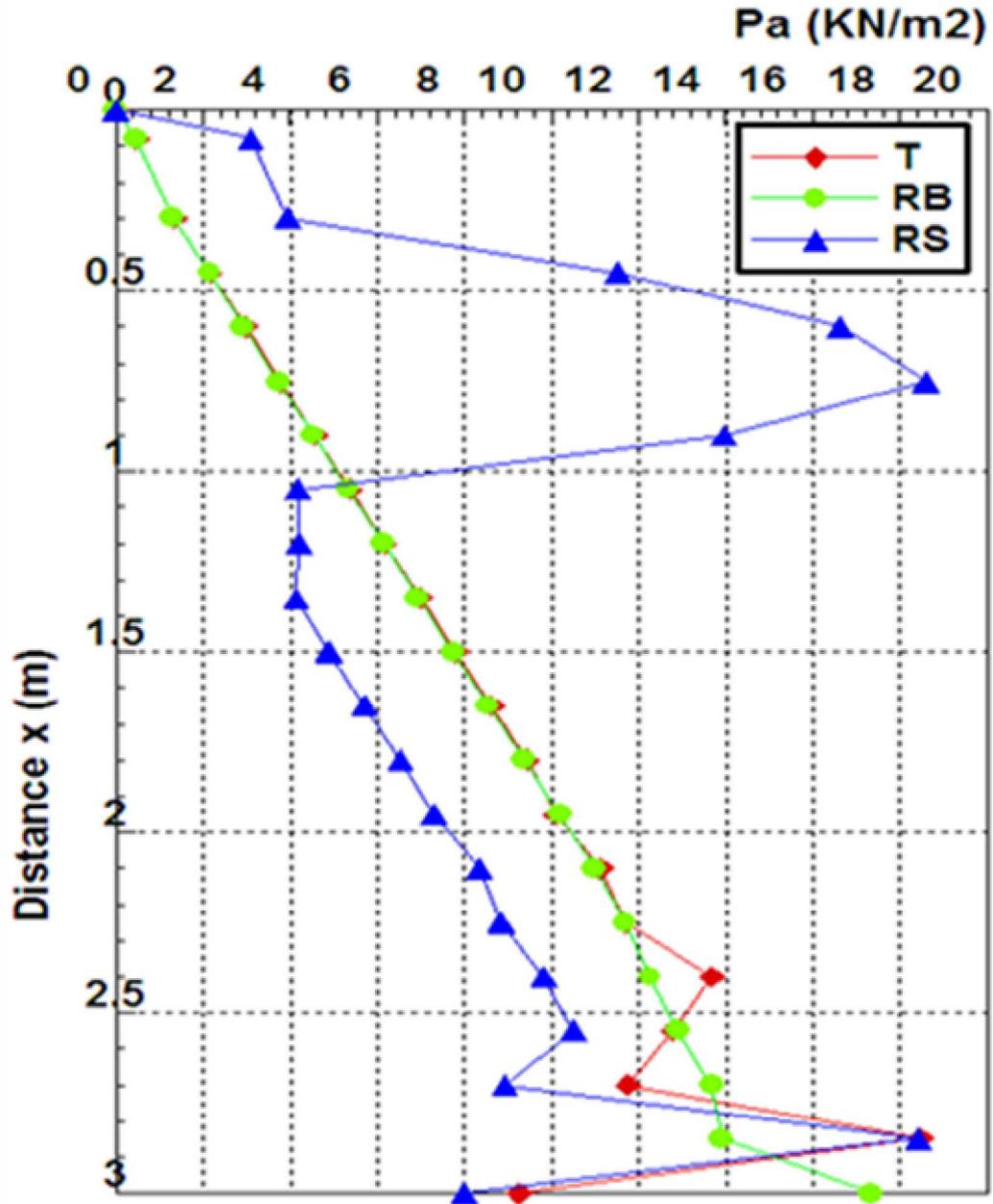


Figure 4-22- Cas de l'écran rigide et rugueux $\delta = \psi = \varphi = 30^\circ$

4-1-5-4-2 Discussions:

L'analyse comparative des résultats des diagrammes des pressions actives permet d'aboutir aux observations suivantes :

- Les diagrammes des trois modes de mouvement se croisent à moins de 50 % de la hauteur de l'écran comptée à partir du sommet.
- Au sommet de l'écran, les pressions du mode de mouvement de rotation par rapport au sommet sont importantes, par contre les pressions des modes de mouvements de translation et de rotation par rapport à la base sont presque confondues et remarquablement négligeable devant celles du mode de rotation par rapport au sommet.
- A la base, les pressions des trois modes de mouvement sont presque confondues.
- La translation et la rotation par rapport à la base ayant une même nature de la distribution de pression

4-1-4-5 Cas du coefficient de butée K_p :

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-8) à (4-14) permet d'établir les interprétations suivantes :

- On observe que l'influence du mode de mouvement de translation sur l'évaluation des coefficients de pression passive de terre a presque le même effet avec le mode de mouvement de rotation par rapport à la base soit en cas de variation de l'angle de frottement de l'interface paroi-sol δ , ou en cas de la variation de φ .
- Le mode T (translation) possède le plus grand coefficient de pression passive, ensuite vient le mode RB (rotation par rapport à la base) et RS (rotation par rapport au sommet), possède le plus faible coefficient de pression passive. avec deux exceptions.
 - 1- Lorsque $\delta = \psi = 0^\circ$ et les sols présentant un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$) on constate que les coefficients de pression de terre K_p de RS sont plus grands que k_p de RB.
 - 2- Lorsque le rapport $\delta/\varphi = 1$, $\psi = 0^\circ$ et les sols présentent un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$) on constate que les coefficients de pression de terre K_p de RB sont plus grands que k_p de T.
- La translation T et la rotation de base RB possèdent les mêmes coefficients de pression passive K_p avec une légère différence n'excédant pas 18%. Cette égalité peut être justifiée par la même nature de pression passive des deux modes. ou par le même déplacement du sommet d'écran.

4-1-5-5-1 Cas de la distribution de pression passive de la terre contre l'écran:

Les figures 4-23a et 4-23b, présentent le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ en fonction du changement du modes de mouvements (T, RB, RS) avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ et 40° respectivement.

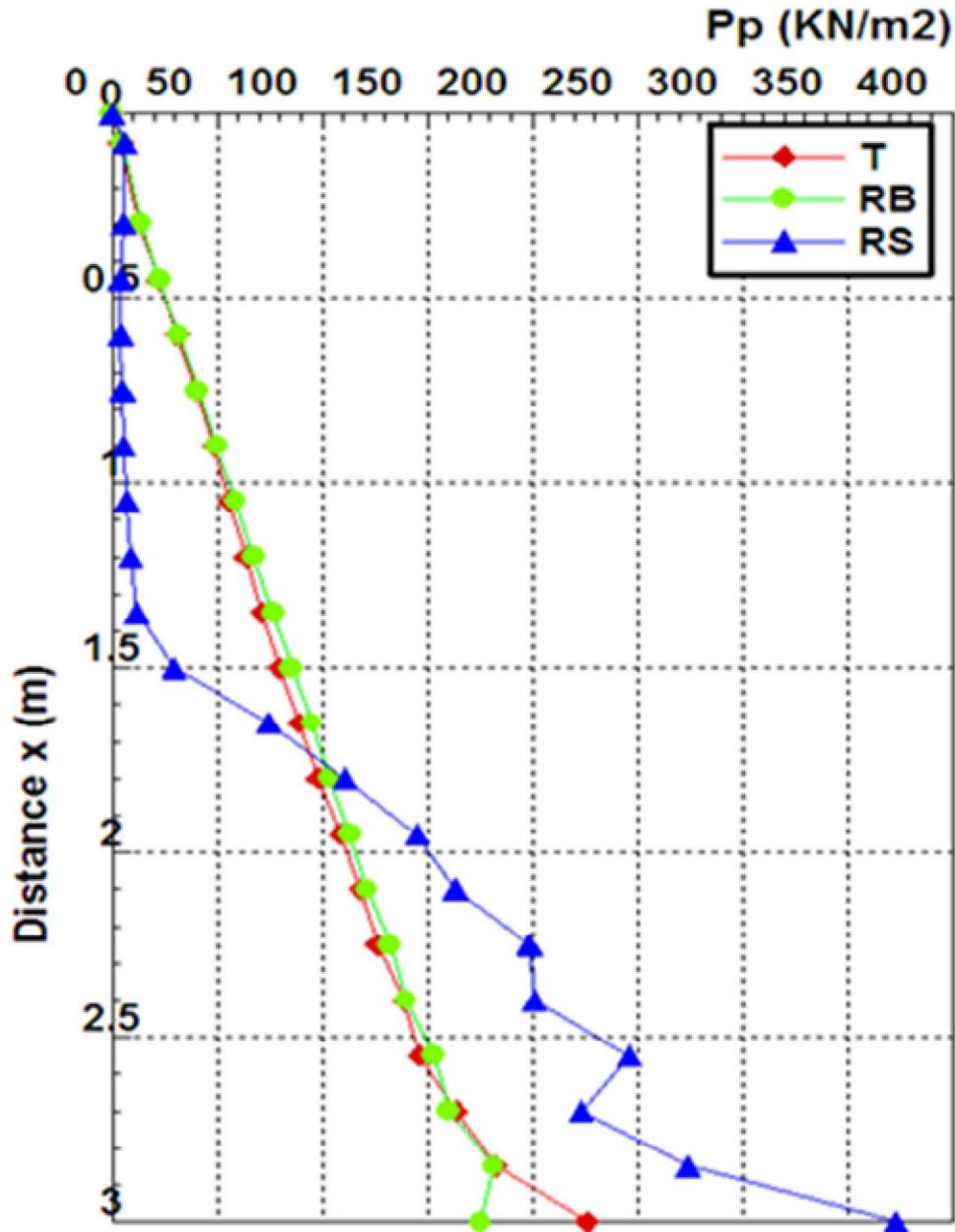


Figure 4-23a- Cas de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ et $\psi = \varphi = 30^\circ$

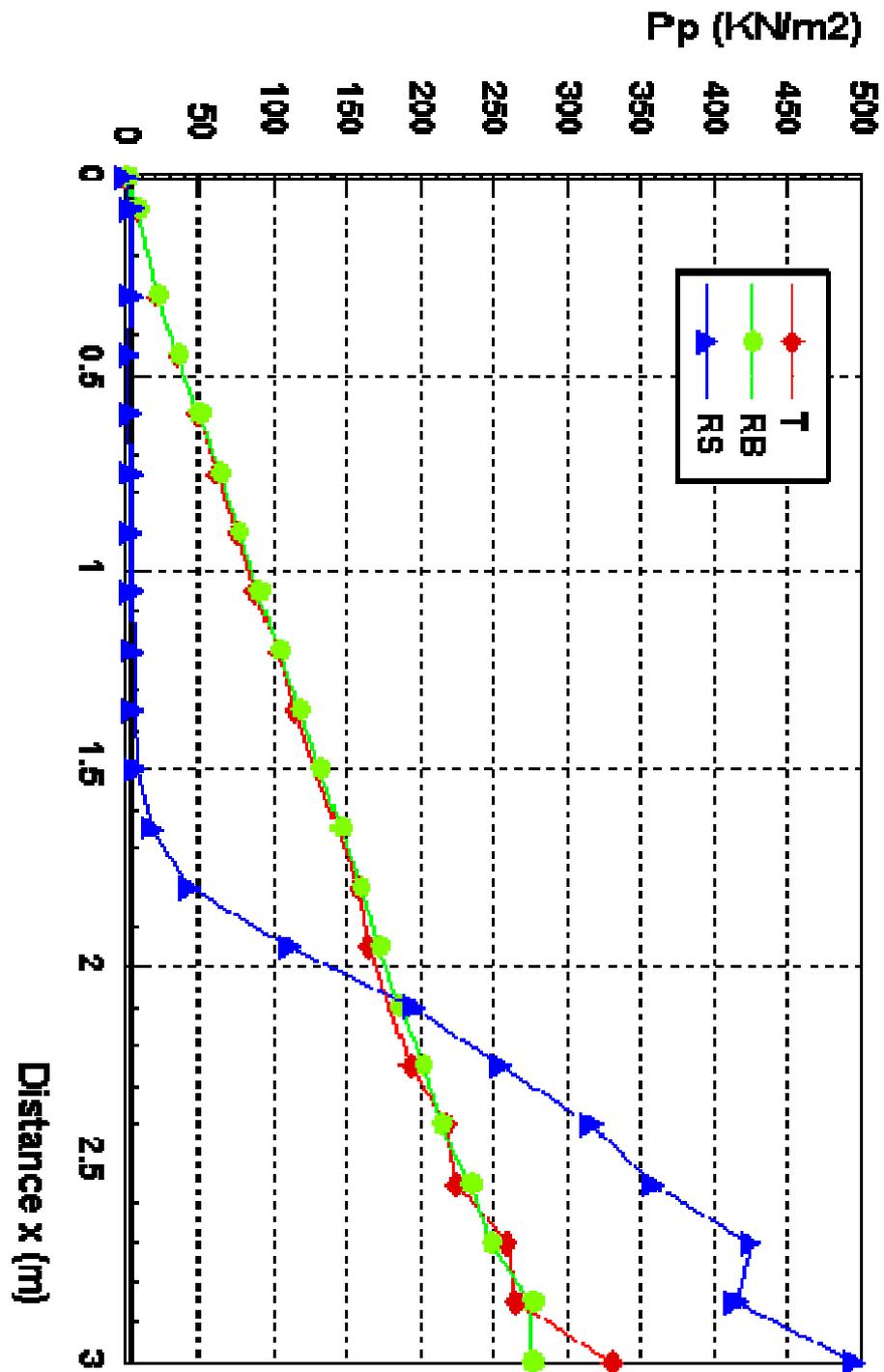


Figure 4-23b- Cas de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ et $\psi = \varphi = 40^\circ$

La figure 4-24, présente le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et rugueux $\delta = \varphi = \psi = 30^\circ$ en fonction du changement du mode de mouvements (T, RB, RS).

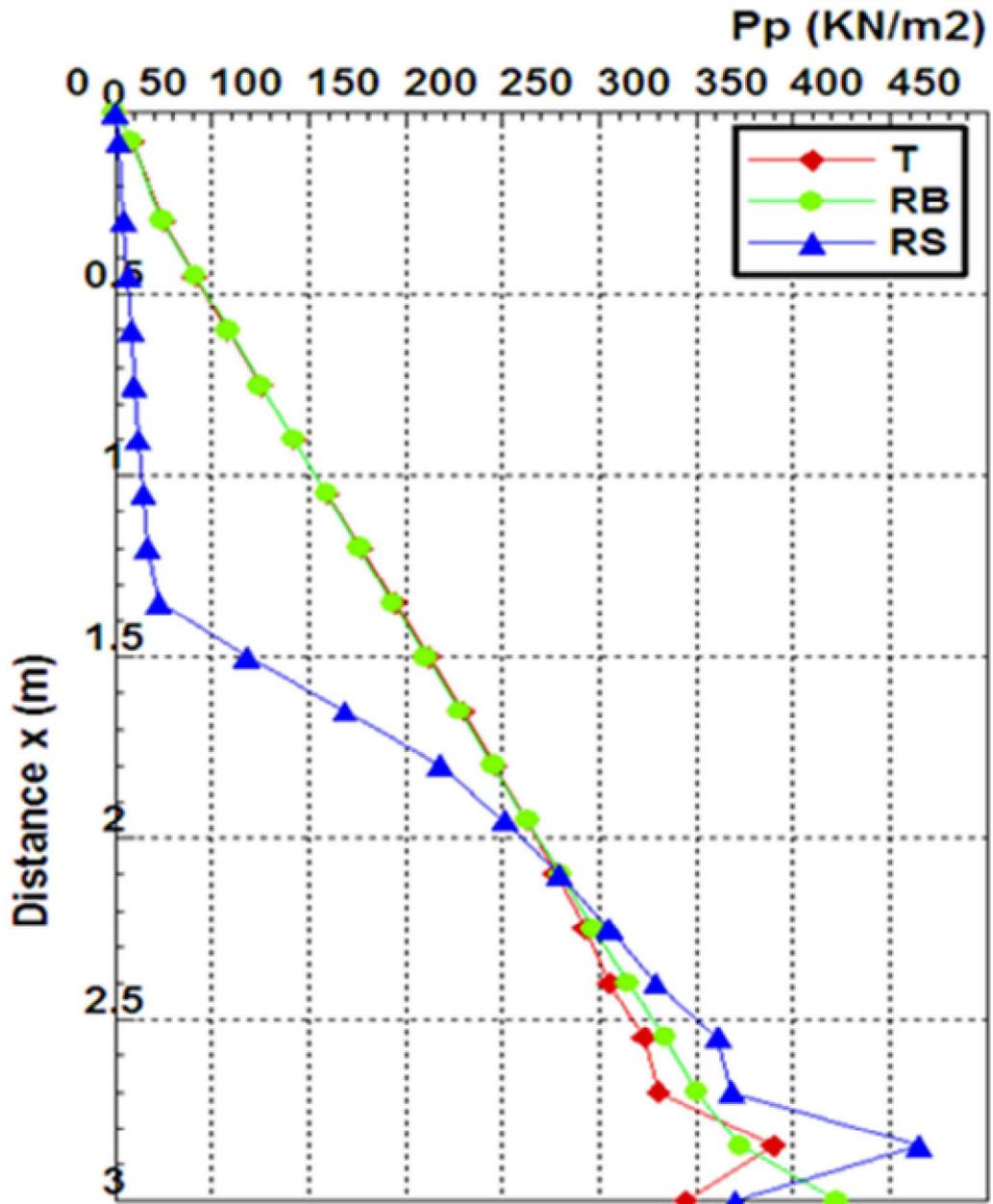


Figure 4-24a- Cas de l'écran rigide et rugueux $\delta = \psi = \varphi = 30^\circ$

4-1-4-5-2 Discussions :

L'analyse comparative des résultats des diagrammes des pressions passives permet d'établir les interprétations suivantes:

- Les diagrammes des trois modes de mouvement se croisent à plus de 50 % de la hauteur de l'écran comptée à partir du sommet.
- Au sommet de l'écran, les pressions du mode de mouvement de rotation par rapport au sommet sont très faible remarquablement négligeables devant celles des modes de mouvements de translation et de rotation par rapport à la base qui sont confondues.
- A la base, et pour un **écran parfaitement lisse $\delta = 0^\circ$** les pressions passives du mode de mouvement de rotation par rapport au sommet sont importantes, par contre les pressions des modes de mouvements de translation et de rotation par rapport à la base sont presque confondues et pour un **écran parfaitement rugueux $\delta = \varphi$** les pressions passives des trois modes sont presque confondues.
- La translation et la rotation par rapport à la base ayant une même nature de la distribution de pression

CHAPITRE 04 :

I N F L U E N C E D E S M O D E S D U M O U V E M E N T E T L A F L E X I B I L I T E D ' E C R A N S U R L E S P R E S S I O N S P A S S I V E S E T A C T I V E S D E S T E R R E S

Introduction :

L'évaluation de la pression active et passive de la terre agissant sur un écran rigide de soutènement est très importante dans la conception de beaucoup de structures géotechniques, (en particulier les murs de soutènement). Les ingénieurs ont traditionnellement calculé la pression active et passive mise à la terre contre les murs rigides en utilisant la théorie de Coulomb ou la formulation de Rankine. Tous les deux supposent que la distribution de la pression active et passive de la terre exercée contre le mur est triangulaire.

Cependant, beaucoup de résultats expérimentaux (Tsagareli, 1965; Matsuo et autres, 1978; Fang et Ishibashi, 1986) démontrent que la distribution de la pression active et passive sur un mur rugueux ($\delta \neq 0$), dépend du mode du mouvement de mur (rotation par rapport au sommet, rotation par rapport à la base ou translation horizontale) est non linéaire, elle est différente de la présentation faite par Coulomb et Rankine. La non-linéarité de la distribution active ou passive de pression des terres résulte des effets de voûte (Handy, 1985)

Un exemple simple d'effet de voûte (inspiré d'ailleurs par Terzaghi (1943) a illustré le concept) est ce qui se produit dans une grande boîte de sol avec un panneau à la base. Quand ce panneau est abaissé, le sol immédiatement au-dessus de lui tendra à se déplacer vers le bas avec lui figure.4-1. Cependant, si la résistance au cisaillement du sol est suffisamment grande, ce qui se produira à la place, est que le poids de la colonne du sol au-dessus du panneau immédiatement mobile sera partiellement transféré au sol. Naturellement, les efforts verticaux dans le sol autour du panneau mobile augmenteront, alors que ceux immédiatement au-dessus de lui diminueront.

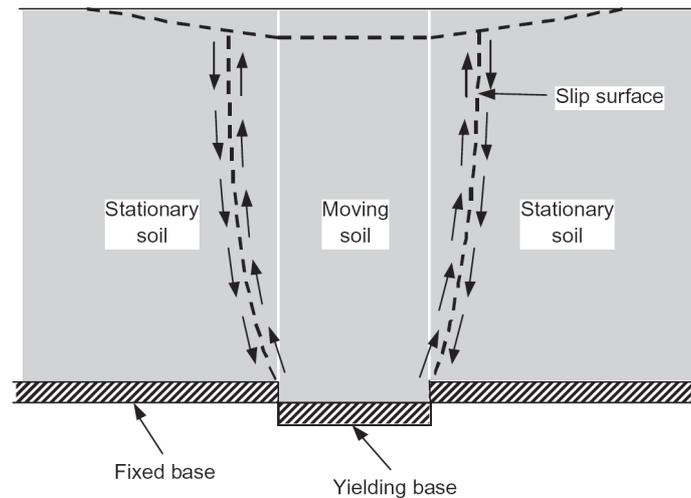


Figure. 4-1- Redistribution d'effort provoquée par l'effet de voûte

Dans ce chapitre la première partie est consacrée à l'estimation numérique de K_p , et K_a coefficients de butée et de poussée respectivement derrière un écran de soutènement rigide d'un côté et le changement de la distribution des pressions de terre passive et active à l'aide du logiciel FLAC 2D et la méthode des différences finies, sous l'influence des angles δ ; ψ ; φ , et sous l'influence du mode de mouvement (translation, rotation par rapport à la base, rotation par rapport au sommet) d'un autre côté.

La deuxième partie est consacrée à la même étude mais derrière un écran de soutènement flexible sous l'influence de la rigidité de l'écran.

Les comparaisons entre les valeurs calculées par nos programmes et mesurées par des solutions existantes Coulomb-Rankine (1776) Caquot-Kerisel (1948) Soubra (2000) Soubra-Macuh (2002) et Bouali Meriem Fakhreddine et N.Bembarck et al (2008) montrent que les programmes proposées prédisent les résultats de manière satisfaisante.

On présente les résultats numériques sous forme de tableaux suivis d'une interprétation et d'une discussion.

Dans la présente étude nous aborderons en premier lieu, le cas des écrans rigides puis le cas des écrans flexibles

4-1 Ecran de soutènement rigide :

4-1-1 Les cas étudiés :

La simulation numérique de la butée et de la poussée est réalisée à l'aide du logiciel FLAC2D. Les figures 4-2a; 4-2b et 4-2c montrent respectivement la modélisation d'un mur de soutènement rigide soumis à trois modes de mouvements ; translation horizontale (T) rotation par rapport à la base (RB) et rotation par rapport au sommet (RS).

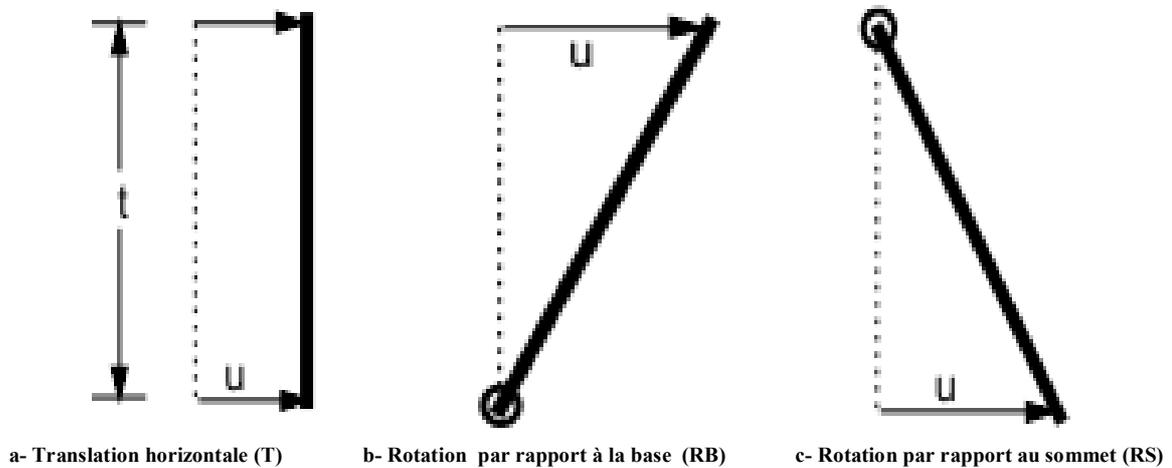


Figure 4-2-Types du mouvement de mur

4-1-2 Présentation des cas étudiés :

On considère un écran rigide d'une longueur égale à t ; un sol homogène isotrope pulvérulent, et une interface.

4-1-2-1 Caractéristiques du sol :

L'un des paramètres les plus importants pour le comportement d'un soutènement est la nature du terrain. Le type de sol, la stratification, les caractéristiques anisotropes du matériau et l'état des contraintes in-situ sont des facteurs primordiaux et pour des raisons de simplification et d'efficacité, le comportement du massif de sol est décrit au moyen du modèle élasto-plastique à critère de Mohr-Coulomb, qui comporte cinq paramètres :

En élasticité,

E: Module d'élasticité de Young,

v: Coefficient de Poisson,

En plasticité,

C: Cohésion,

ϕ : Angle de frottement interne du sol.

ψ : Angle de dilatance de sol.

Sol	γ (kg/m)	c (Pa)	ϕ, ψ (degré)	G	kv(m/s)
sable	2000	0	(10;15;20;25;30;35;40)	$2.5 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$

γ : Poids volumique

K_v : Module volumique

G: Module de cisaillement

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

4-1-2-2 Maillage :

La figure 4-3 montre le maillage retenu pour la simulation dans le cas de la poussée et de la butée. Ce maillage est raffiné au voisinage de la paroi.

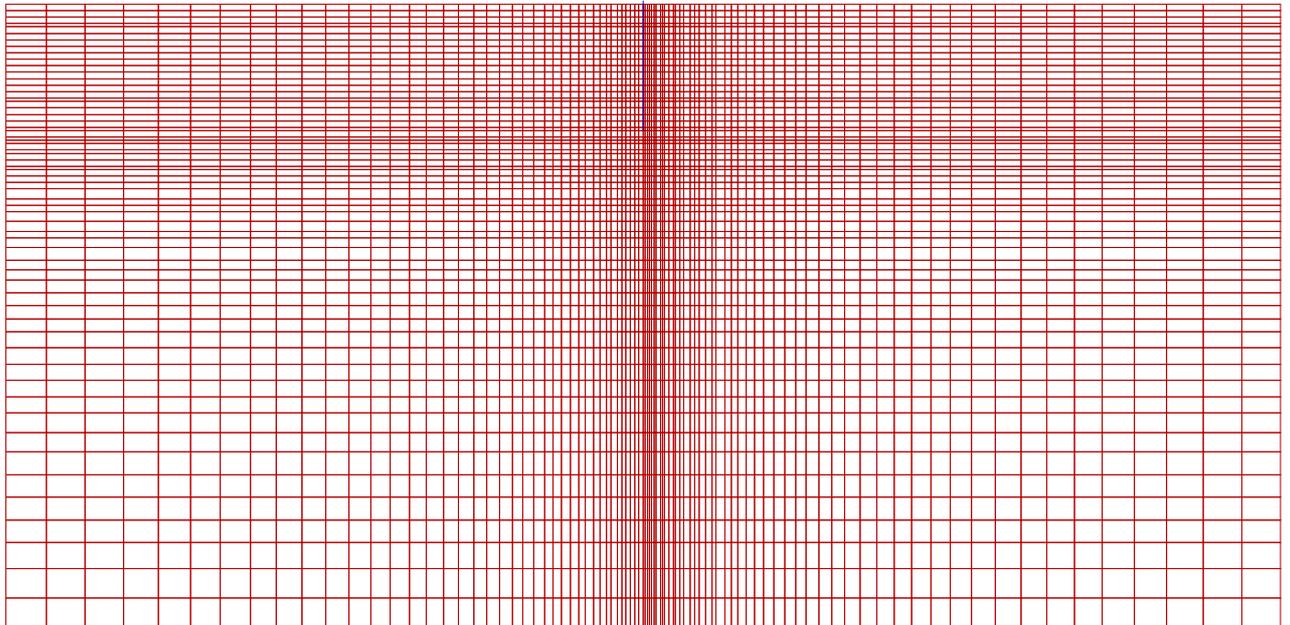


Figure 4-3- le maillage retenu

4-1-2-3 Dimensions et conditions aux limites :

Les conditions aux limites consistent à bloquer :

- Les déplacements horizontaux sur les deux faces verticales ($U_x = 0$)
- Les déplacements horizontaux et verticaux à la base du maillage, ($U_x = U_y = 0$)

4-1-2-4 Caractéristiques de l'interface :

L'interface est caractérisée par un angle de frottement δ , une cohésion nulle, une rigidité normale $K_n = 10^9$ Pa/m et une rigidité de cisaillement $K_s = 10^9$ Pa/m. Les valeurs de rigidité de l'interface sont choisies de manière à simuler un contact rigide entre le sol et le rideau.

4-1-2-5 Caractéristiques de l'écran :

La modélisation bidimensionnelle d'un rideau et de son comportement en flexion peut être réalisée de deux manières différentes :

- Soit avec des éléments massifs,
- Soit avec des éléments poutres à condition que la compatibilité soit assurée.

L'écran rigide est modélisé par des éléments quadrilatères. Il est connecté au sol via des éléments d'interface de type Mohr – Coulomb.

4-1-2-6 Procédure de simulation :

La procédure de simulation de la butée ou de la poussée du terrain soutenu par un écran de soutènement rigide adoptée dans la présente analyse est basée sur les deux étapes suivantes :

- Un calcul mécanique afin d'établir l'état de contraintes initiales. (L'effet de l'installation de l'écran dans le sol sur les contraintes est négligé)
- Un calcul mécanique de l'effet de la butée ou de la poussée du terrain sur l'écran.

a- Cas de translation horizontal de l'écran :

On impose à l'écran (sur le long de sa hauteur) une vitesse de déplacement très faible vers le sol et sur une direction, la résistance maximale à la butée ou minimale à la poussée du terrain est générée en imposant une vitesse de déplacement des nœuds des éléments qui discrétisent l'écran. Le déplacement des nœuds du sol en contact avec l'écran obéit à la loi

de comportement de l'interface sol-écran. Au cours du déplacement de l'écran, on enregistre la butée ou la poussée à travers la résultante des contraintes normales sur l'écran.

$$K_p = 2.P_p / \gamma.t^2 = 2.P_x / \gamma.t^2.\cos\delta$$

Avec :

P_p : Résultante de la butée du terrain ;

P_a : Résultante de la poussée du terrain ;

P_x : Résultante de contraintes normales sur l'écran ;

γ : Poids volumiques du sol ;

t : Hauteur de l'écran ;

δ : Angle de frottement de l'interface.

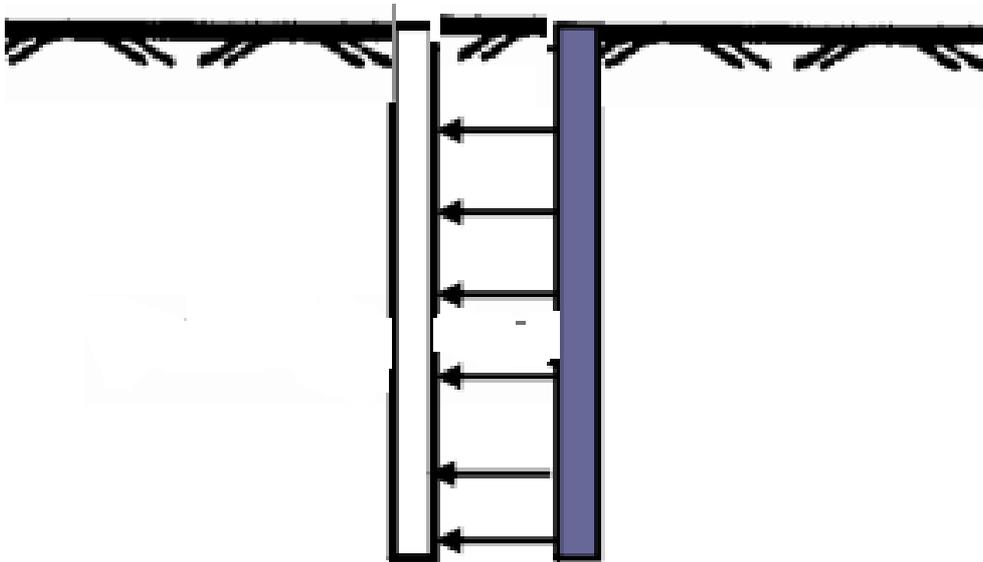


Figure 4-4- Présentation de la poussée et de la butée en cas de translation

b - Cas de rotation par rapport à la base de l'écran :

On impose à l'écran (sur le nœud de la tête d'écran) une vitesse de déplacement très faible vers le sol et sur une direction, la résistance maximale à la butée ou minimale à la poussée du terrain est générée. Le déplacement des nœuds du sol en contact avec l'écran obéit à la loi de comportement de l'interface sol-écran. Au cours du déplacement de l'écran, on enregistre la butée ou la poussée à travers la résultante des contraintes normales sur l'écran.

c- Cas de rotation par rapport au sommet de l'écran :

On impose à l'écran (sur le nœud de la base d'écran) une vitesse de déplacement très faible vers le sol et sur une direction, la résistance maximale à la butée ou minimale à la poussée du terrain est générée. Le déplacement des nœuds du sol en contact avec l'écran obéit à la loi de comportement de l'interface sol-écran. Au cours du déplacement de l'écran, on enregistre la butée ou la poussée à travers la résultante des contraintes normales sur l'écran.

4-1-3 Présentation des résultats numériques:

Dans le but de mettre en évidence la sensibilité du coefficient de la pression passive et active des terres, à l'angle de frottement interne φ , à l'angle de l'interface δ , l'angle de dilataance ψ et aux modes de mouvement (T, RB, RS), les tableaux (4-1) à (4-7) et (4-8) à (4-14) donnent respectivement les coefficients de la pression active et passive effective des terres pour quatre valeurs de l'angle de l'interface $\delta/\varphi = 0, 1/3, 2/3$ et 1, et pour trois valeurs de l'angle de dilataance $\psi/\varphi = 0, 1/2, (1 \text{ ou } 2/3)$, pour sept valeurs de l'angle de frottement interne $\varphi = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$

Tableau 4-1-Coefficients de la pression active des terres pour $\varphi = 10^\circ$										
δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.70	0.70	0.72	0.704	0.704				
	5	0.69	0.70	0.71						
	10	0.69	0.70	0.70						
5	0	0.66	0.66	0.69	0.662	0.664				
	5	0.66	0.66	0.68						
	10	0.66	0.66	0.67						
10	0	0.64	0.65	0.67	0.634	0.642				
	5	0.64	0.65	0.66						
	10	0.64	0.65	0.66						

Tableau 4-2-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 15^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.58	0.59	0.59	0.588	0.589				
	15	0.58	0.59	0.58						
5	0	0.55	0.56	0.57	0.555	0.557				
	15	0.54	0.56	0.56						
10	0	0.53	0.54	0.55	0.532	0.536				
	15	0.53	0.54	0.55						
15	0	0.53	0.53	0.55	0.517	0.525				
	15	0.52	0.53	0.54						

Tableau 4-3-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 20^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.48	0.49	0.49	0.490	0.490				0.49
	10	0.48	0.49	0.49						0.48
	20	0.48	0.49	0.49			0.47	0.47	0.50	0.48
10	0	0.45	0.45	0.47	0.448	0.446				
	10	0.44	0.45	0.47						
	20	0.44	0.45	0.47						
20	0	0.44	0.44	0.47	0.434	0.429				
	10	0.43	0.44	0.46						
	20	0.43	0.44	0.46			0.42	0.44	0.49	

Tableau 4-4-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 25^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.40	0.40	0.43	0.405	0.406				
	25	0.39	0.41	0.42						
25	0	0.37	0.37	0.42	0.355	0.361				
	25	0.35	0.37	0.39						

Tableau 4-5-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 30^\circ$										
δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.33	0.33	0.39	0.333	0.333				0.34
	15	0.32	0.33	0.38						0.32
	30	0.32	0.34	0.35			0.33	0.31	0.35	0.32
10	0	0.31	0.31	0.37	0.308	0.309				0.32
	15	0.30	0.31	0.36						0.31
	30	0.30	0.32	0.33			0.30	0.30	0.33	0.31
15	0	0.31	0.30	0.37	0.301	0.302				
	15	0.29	0.31	0.35						
	30	0.29	0.31	0.33						
20	0	0.31	0.31	0.37	0.297	0.299				0.31
	15	0.29	0.31	0.35						0.30
	30	0.28	0.31	0.33			0.31	0.31	0.36	0.29
30	0	0.31	0.31	0.39	0.297	0.302				
	15	0.31	0.31	0.36						
	30	0.29	0.31	0.33			0.42	0.40	0.43	

Tableau 4-6-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 35^\circ$										
δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.27	0.27	0.36	0.270	0.271				0.30
	35	0.26	0.29	0.29						0.26
35	0	0.26	0.27	0.37	0.254	0.254				
	35	0.25	0.27	0.29						

Tableau 4-7-Coefficients de la pression active des terres pour $\phi = 40^\circ$										
δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS			T	RB	RS	
0	0	0.21	0.21	0.33	0.217	0.214				0.26
	20	0.21	0.21	0.31						0.22
	40	0.20	0.21	0.23						0.21
20	0	0.20	0.20	0.31	0.199	0.200				
	20	0.20	0.20	0.28						
	40	0.19	0.20	0.23						
40	0	0.22	0.22	0.34	0.210	0.214				
	20	0.21	0.22	0.31						
	40	0.21	0.22	0.29						

Tableau 4-8-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 10^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	1.42	1.41	1.38	1.42	1.42						
	5	1.42	1.41	1.38								
	10	1.43	1.42	1.38								
5	0	1.55	1.54	1.50	1.56	1.56						
	5	1.56	1.54	1.50								
	10	1.56	1.55	1.50								
10	0	1.66	1.64	1.59	1.73	1.68						
	5	1.66	1.63	1.59								
	10	1.66	1.64	1.59								

Tableau 4-9-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 15^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	1.70	1.65	1.65	1.69	1.70						
	15	1.72	1.69	1.65								
5	0	1.89	1.84	1.82	1.90	1.89						
	15	1.90	1.87	1.82								
10	0	2.07	2.01	1.95	2.13	2.08						
	15	2.08	2.04	1.95								
15	0	2.21	2.15	2.03	2.40	2.27						
	15	2.21	2.15	2.03								

Tableau 4-10-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 20^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	2.04	1.98	1.98	2.03	2.13						2.06
	10	2.06	2.01	1.98								2.07
	20	2.06	2.04	1.98					2.13	2.09	2.03	2.07
10	0	2.56	2.43	2.39	2.63	2.58						
	10	2.58	2.51	2.39								
	20	2.58	2.55	2.39								
20	0	2.96	2.85	2.60	3.52	3.03	3.12	3.13				
	10	3.02	2.98	2.72								
	20	3.02	3.02	2.74					3.03	3.03	2.72	

Tableau 4-11-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 25^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	2.46	2.35	2.35	2.46	2.46						
	25	2.52	2.44	2.37								
25	0	3.95	3.83	3.28	5.59	4.62						
	25	4.35	4.35	3.80								

Tableau 4-12-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 30^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BENMEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	2.95	2.77	2.82	3.00	3.11						2.98
	15	3.04	2.93	2.92								3.04
	30	3.09	2.97	2.92					3.11	3.10	2.89	3.06
10	0	3.98	3.71	3.50	4.14	4.01						3.98
	15	4.05	3.90	3.65								4.03
	30	4.06	4.01	3.65					4.01	4.10	3.54	4.03
15	0	4.49	4.26	3.58	4.97	4.71						
	15	4.62	4.45	4.07								
	30	4.64	4.61	4.07								
20	0	4.85	4.84	3.84	6.10	5.10						4.92
	15	5.22	5.06	4.46								5.17
	30	5.27	5.22	4.48					5.10	5.30	4.37	5.210
30	0	5.30	5.76	4.19	10.09	6.30	6.86	6.93				
	15	6.31	6.26	5.33								
	30	6.47	6.46	5.55					6.30	6.45	5.21	6.33

Tableau 4-13-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 35^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)	BOUALI MERIEM			BEN MEBAREK 2008
		T	RB	RS					T	RB	RS	
0	0	3.54	3.25	3.46	3.69	3.69						3.54
	35	3.81	3.70	3.54								3.76
35	0	7.13	8.45	5.36	22.97	11.7	11.13					
	35	10.22	9.93	8.61								10.10

Tableau 4-14-Coefficients de la pression passive des terres pour $\phi = 40^\circ$

δ	ψ	FLAC-2D			COULOMB 1776	CAQUOT 1948	SOUBRA (2000)	SOUBRA et MACUH (2002)
		T	RB	RS				
0	0	4.32	3.89	4.24	4.59	4.60		
	20	4.67	4.42	4.42				
	40	4.71	4.66	4.46				
20	0	7.75	6.90	5.56	11.77	10.1		
	20	9.48	8.97	7.43				
	40	9.75	9.72	7.78				
40	0	9.72	9.90	6.90	92.55	20.9	19.62	20.01
	20	16.44	16.44	12.55				
	40	16.97	16.87	13.97				

4-1-4 L'influence du mode de mouvement et des angles δ ; ψ ; φ ; sur l'évaluation des coefficients et les diagrammes de pression de terre contre l'écran de soutènement rigide :

Le calcul du k_a et k_p est basé sur la technique d'augmentation du déplacement d'écran jusqu'à l'obtention d'un mécanisme de rupture (détection de l'instabilité à travers le suivi de l'historique du déplacement horizontal de l'écran et de la force passive ou active), c'est à dire l'enfoncement de l'écran dans le sol est accompagné par l'augmentation progressive de la force normale effective passive ou active des terres P_p et P_a respectivement qui se stabilise en indiquant un palier. Ce palier correspond à la force maximale de la composante horizontale de la butée ou de la poussée.

Les résultats de la variation des coefficients de pression de terre active et passive autour d'un écran rigide, en fonction de l'angle de frottement interne du sol et de l'interface sol-écran et aussi l'angle de dilatance du sol ayant un effet presque négligeable est récapitulé dans les tableaux (4-1) à (4-14).

4-1-4-1 Pression active de terre (K_a) :

Les différentes valeurs du coefficient actif de la terre K_a pour les différents modes de mouvement, présentées ci-dessus, sont regroupées dans les tableaux (4-1) à (4-7) pour des raisons de comparaison avec quatre solutions existantes de Coulomb-Rankine (1776), Caquot- Kérisel (1948), Bouali Meriem Fakhreddine, et Benmebarek.

4-1-4-2 Évaluation de la pression active (k_a) de terre contre l'écran rigide :

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-1) à (4-7) permet d'établir les interprétations suivantes :

Les tableaux (4-1) à (4-7) montrent la diminution du coefficient actif de la terre (K_a) quelle que soit le mode de mouvement avec :

- **l'augmentation de l'angle de frottement du sol φ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement de l'interface sol-paroi $\delta = (0, 1/2, 1/3, 2/3, 1) \varphi$ ou les valeurs des angles de dilatance du sol $\psi = (0, 1, 1/2) \varphi$.
- **l'augmentation de l'angle de frottement sol-paroi δ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement du sol φ ou les valeurs des angles de dilatance du sol $\psi = (0, 1/2, 1) \varphi$.
- **l'augmentation de l'angle de dilatance du sol ψ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement du sol φ ou les valeurs des angles de frottement de l'interface sol-paroi $\delta = (0, 1/2, 1/3, 2/3, 1)$, on constate que la variation de l'angle de dilatance ψ donne une légère augmentation du coefficient de poussée uniquement pour le mode de mouvement de rotation par rapport à la base et pour les angles de frottements interne du sol ($\varphi = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$) et l'angle de frottement de l'interface sol-paroi ($\delta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$).

l'effet de la dilatance ψ présente une faible sensibilité ou presque négligeable devant la sensibilité des angles de frottements interne du sol φ , et des angles de frottement de l'interface sol-paroi δ .

L'effet de frottement interne φ est plus significatif que les deux autres effets étudiés (effet de l'angle de frottement de l'interface sol-paroi δ et l'effet de l'angle de dilatance ψ) pour les trois modes de mouvements translation, rotation par rapport à la base et rotation par rapport au sommet.

4-1-4-2-1 Cas de translation :

Le figure 4-5, montre la variation de la force horizontale active en fonction du déplacement horizontal de l'écran rigide avec $\varphi = \delta = \psi = 40^\circ$.

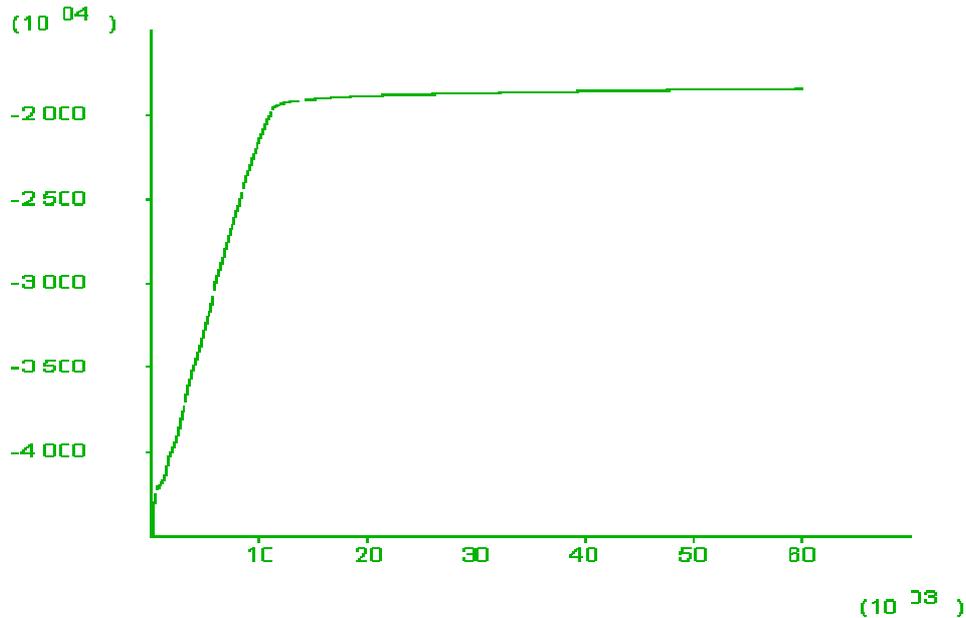


Figure 4-5- Montre la variation de la force horizontale active en fonction du déplacement horizontal de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ et ($\varphi = \psi = 40^\circ$)

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-1) à (4-7) permet d'établir les observations suivantes :

- Les valeurs du coefficient actif de terre K_a obtenues numériquement (FLAC 2D) sont en parfait accord avec les valeurs actuellement utilisées de Caquot–Kérisel, et les valeurs de Coulomb-Rankine.
- Les valeurs du coefficient actif de la terre K_a obtenues numériquement (FLAC 2D) sont très proches à celles de Bouali Meriem Fakhreddine avec une différence n'excédant pas 9.1%, sauf pour $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$ où on observe une différence importante.

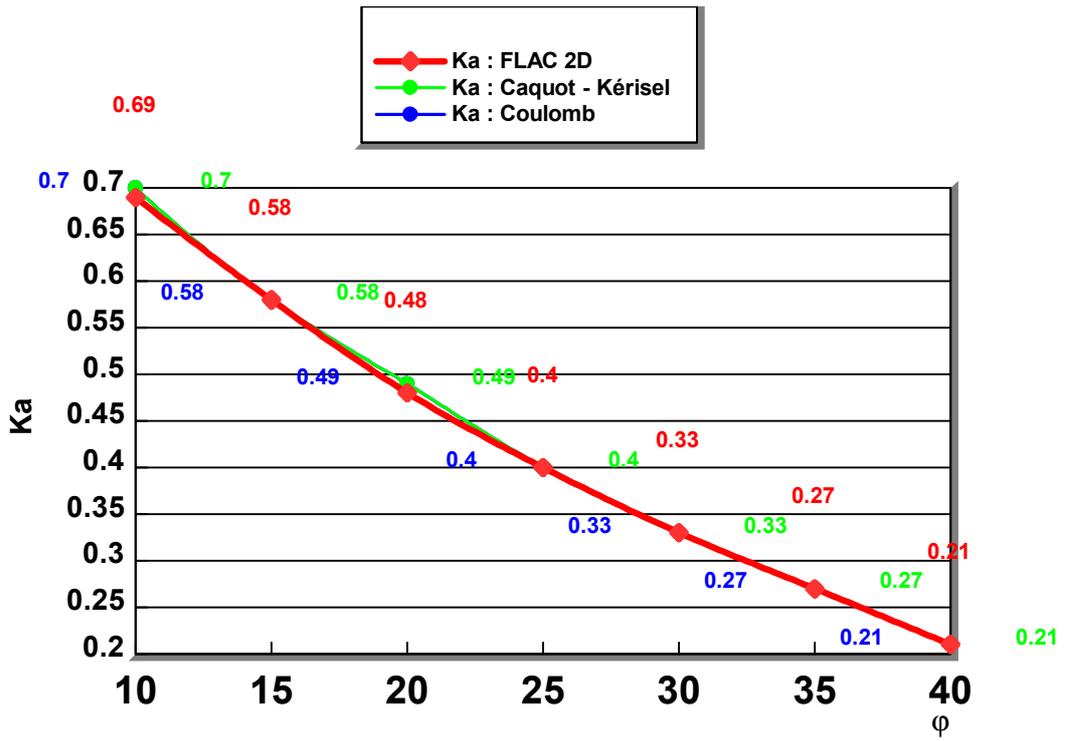


Figure 4-6a Cas de translation avec $\phi = \psi$, et $\delta = 0^\circ$

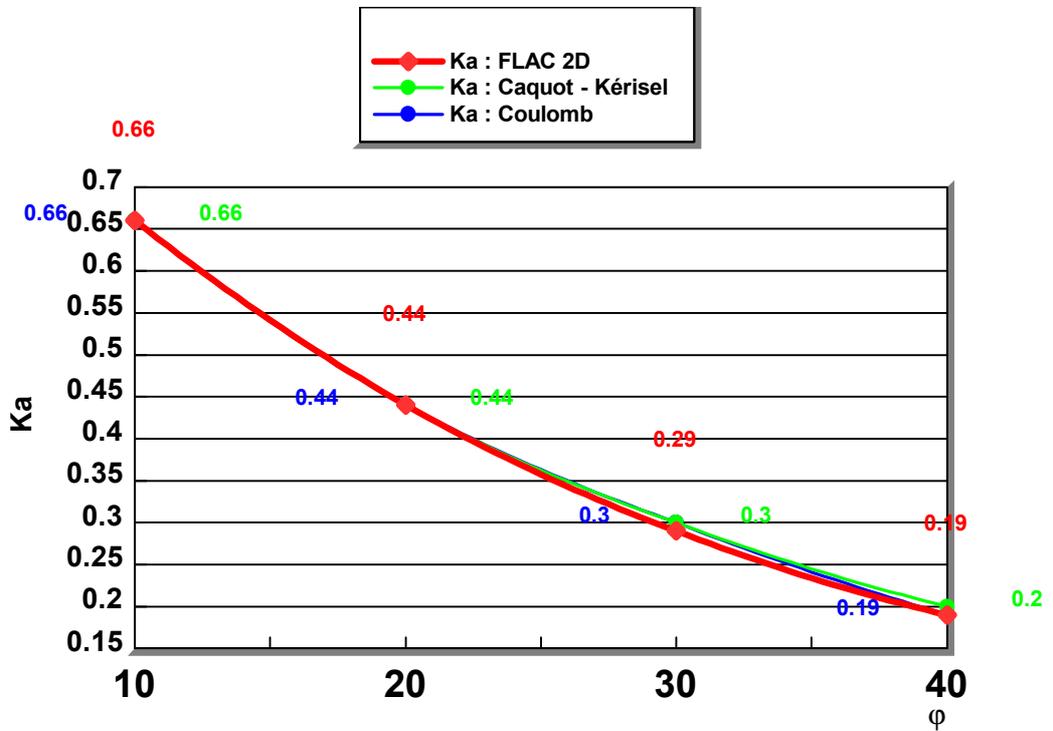


Figure 4-6b Cas de translation avec $\phi = \psi$, et $\delta = 1/2 \phi$

4-1-4-2-1-1 Distribution de la pression active de terre contre l'écran:

Les figures 4-7a, 4-7b, présentent le changement de la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

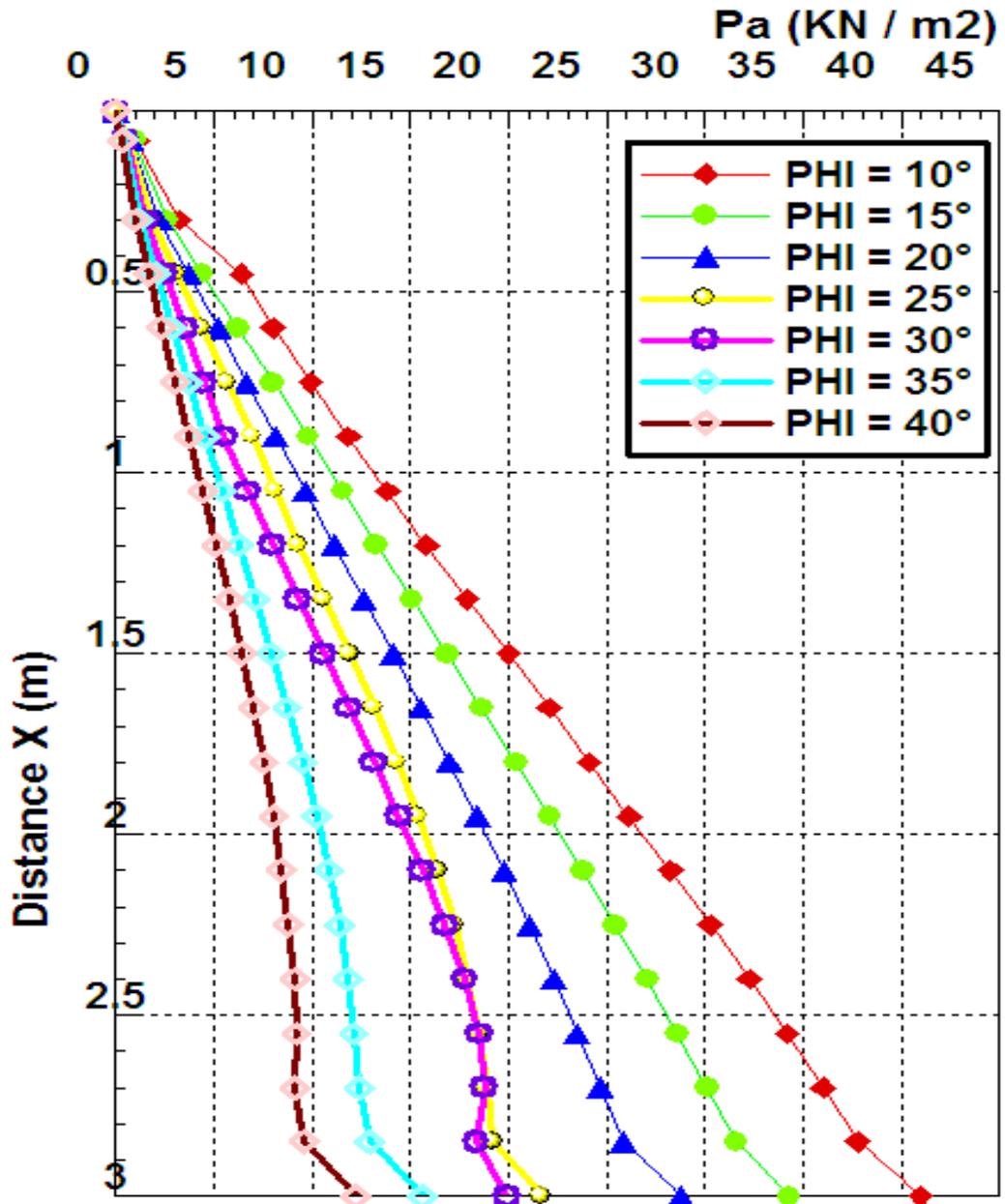


Figure 4-7a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran lisse $\delta = 0^\circ$ et rigide avec $\psi = \varphi$
Cas de translation

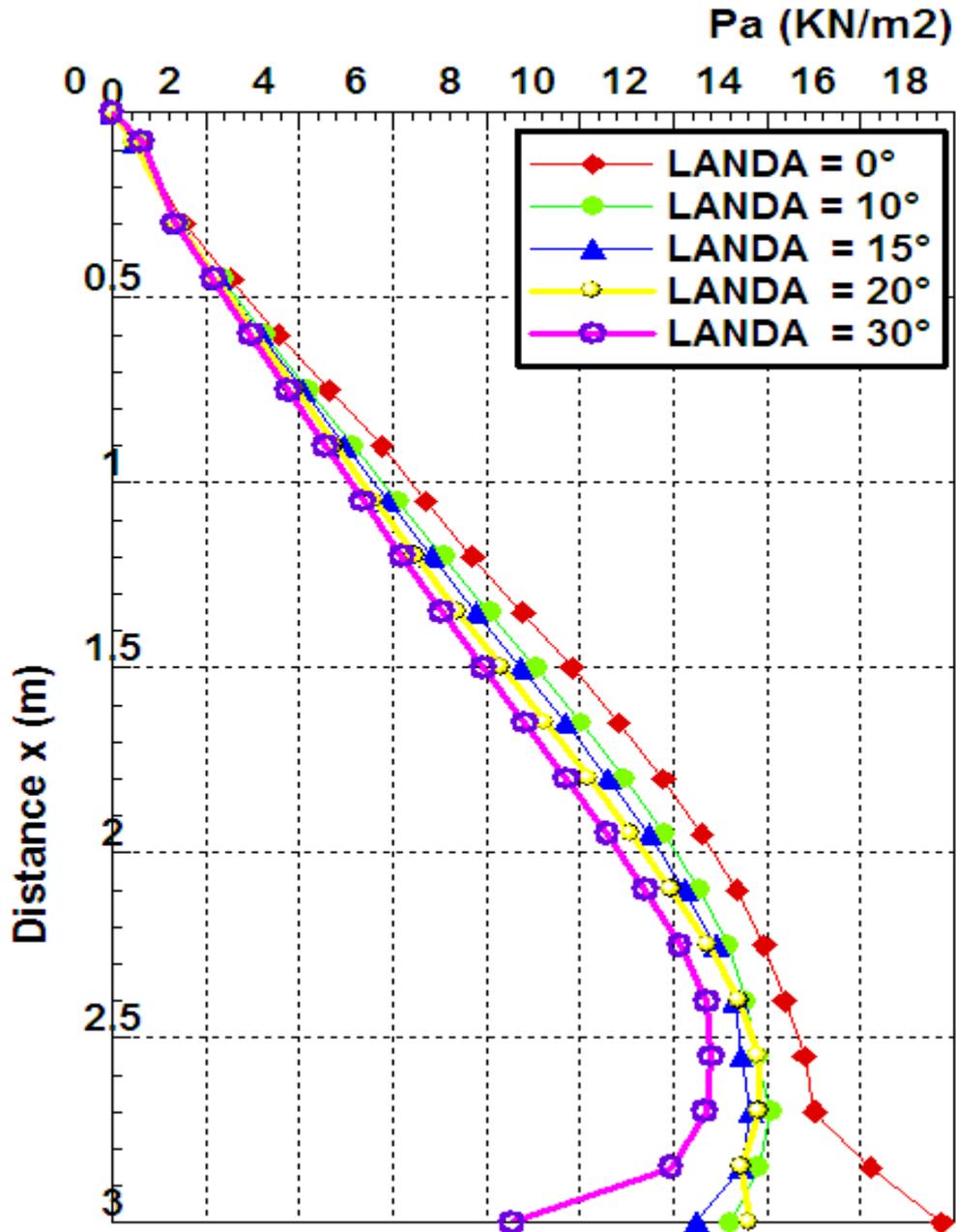


Figure 4-7b- Présente l'effet du changement de l'angle de l'interface Paroi-sol (δ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \phi = 30^\circ$
Cas de translation

4-1-4-2-1-2 Discussion :

- La figure 4-7a montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **translation horizontale** d'un écran rigide est triangulaire pour $\delta = 0^\circ$, lequel est conforme à la théorie de Rankine, avec un effet remarquable de l'augmentation de l'angle φ sur les pressions de terre, tant que φ augmente la pression active agissant sur le mur diminue.
- La figure 4-7b montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **translation horizontale** d'un écran rigide est triangulaire pour $\delta = 0^\circ$, au lequel est conforme a la théorie de Rankine. Il peut également être vu que la distribution de la pression active de terre change de triangulaire à non linéaire à la base de l'écran, tant que δ augmente, la pression active agissant sur le mur diminue.

4-1-4-2-2 Cas de rotation par rapport à la base :

La figure 4-8, montre la variation de la force horizontale active en fonction de la rotation par rapport à la base de l'écran rigide avec $\delta = 0$ et $\varphi = \psi = 40^\circ$.

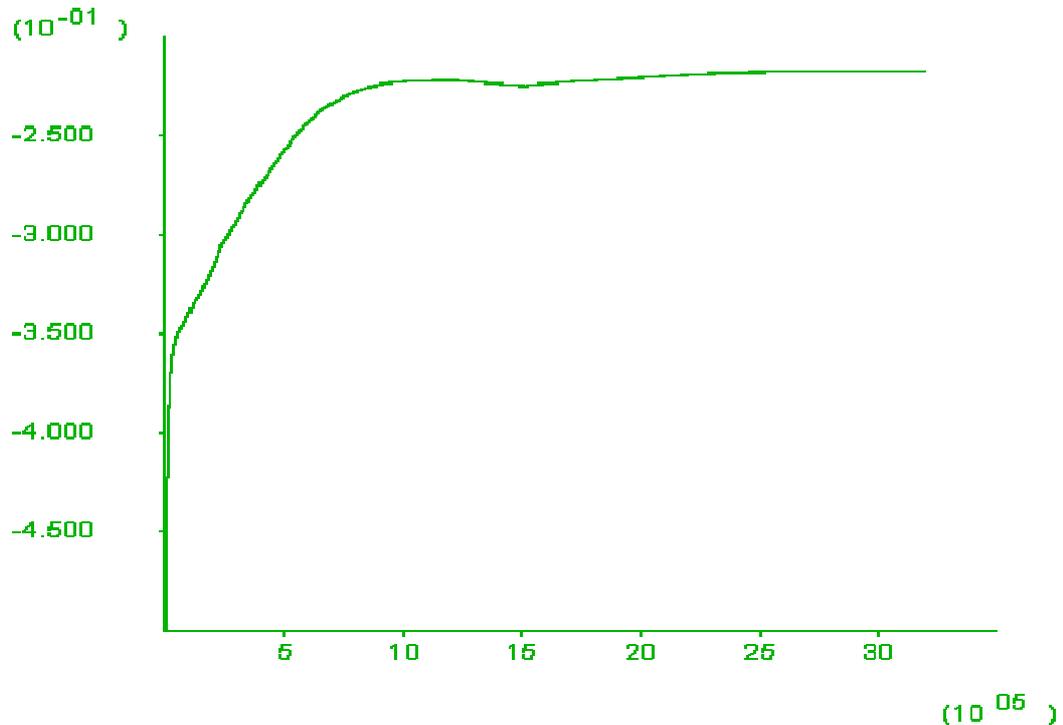


Figure 4-8- Montre la variation de la force horizontale active en fonction de la rotation par rapport à la base de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ et ($\varphi = \psi = 40^\circ$)

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-1) à (4-7) permet d'établir les observations suivantes :

- Les valeurs du coefficient actif de la terre K_a obtenues numériquement (FLAC 2D) sont très proches à celles de Bouali Meriem Fakhreddine avec une différence n'excédant pas 9.1% sauf en cas de $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$ on observe une différence importante.

4-1-4-2-2-1 Distribution de la pression active de la terre contre l'écran:

Les figures 4-9a, 4-9b, présentent le changement de la distribution de la pression normale active de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

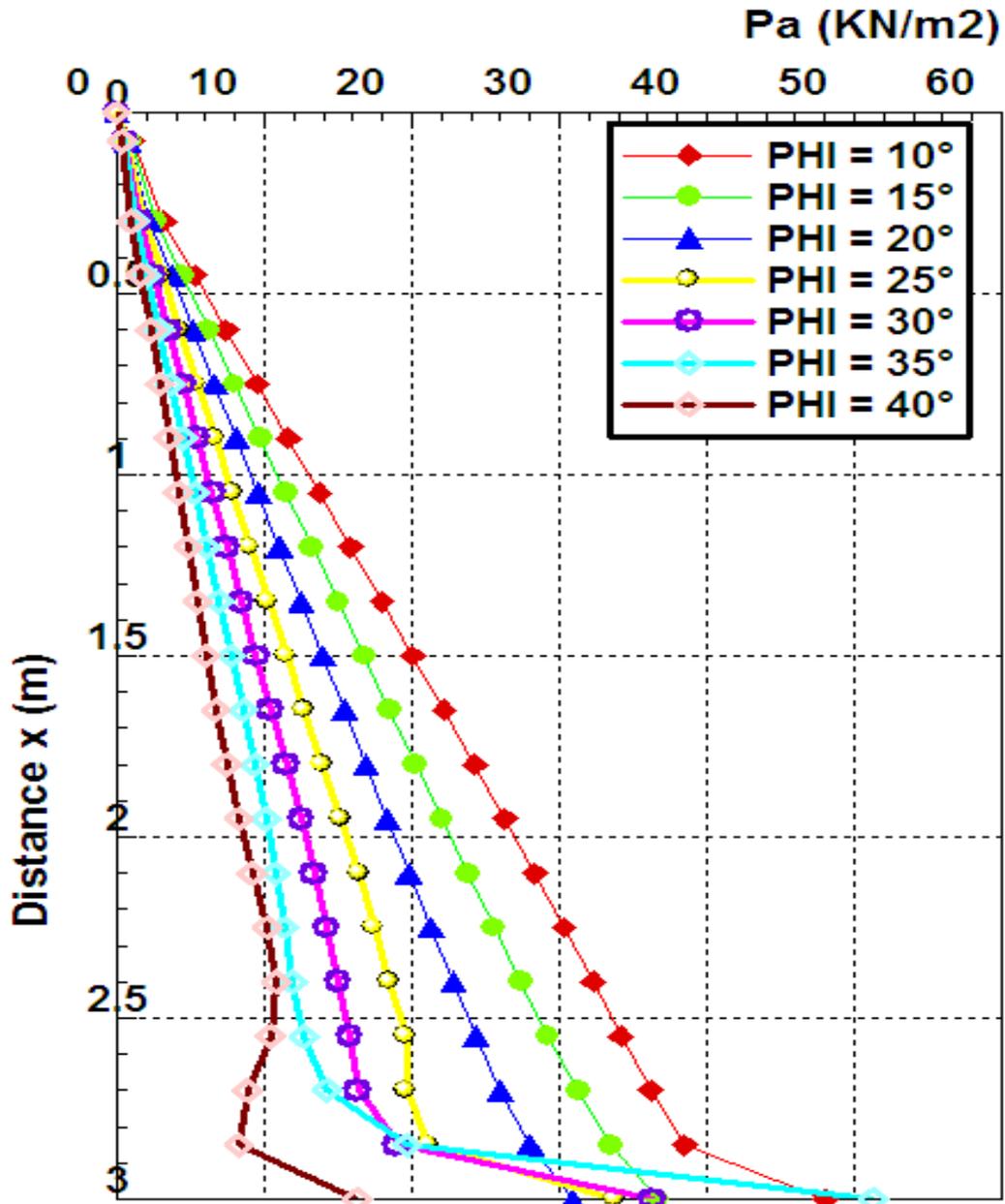


Figure 4-9a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol φ sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ et $\psi = \varphi$
Cas de rotation par rapport à la base

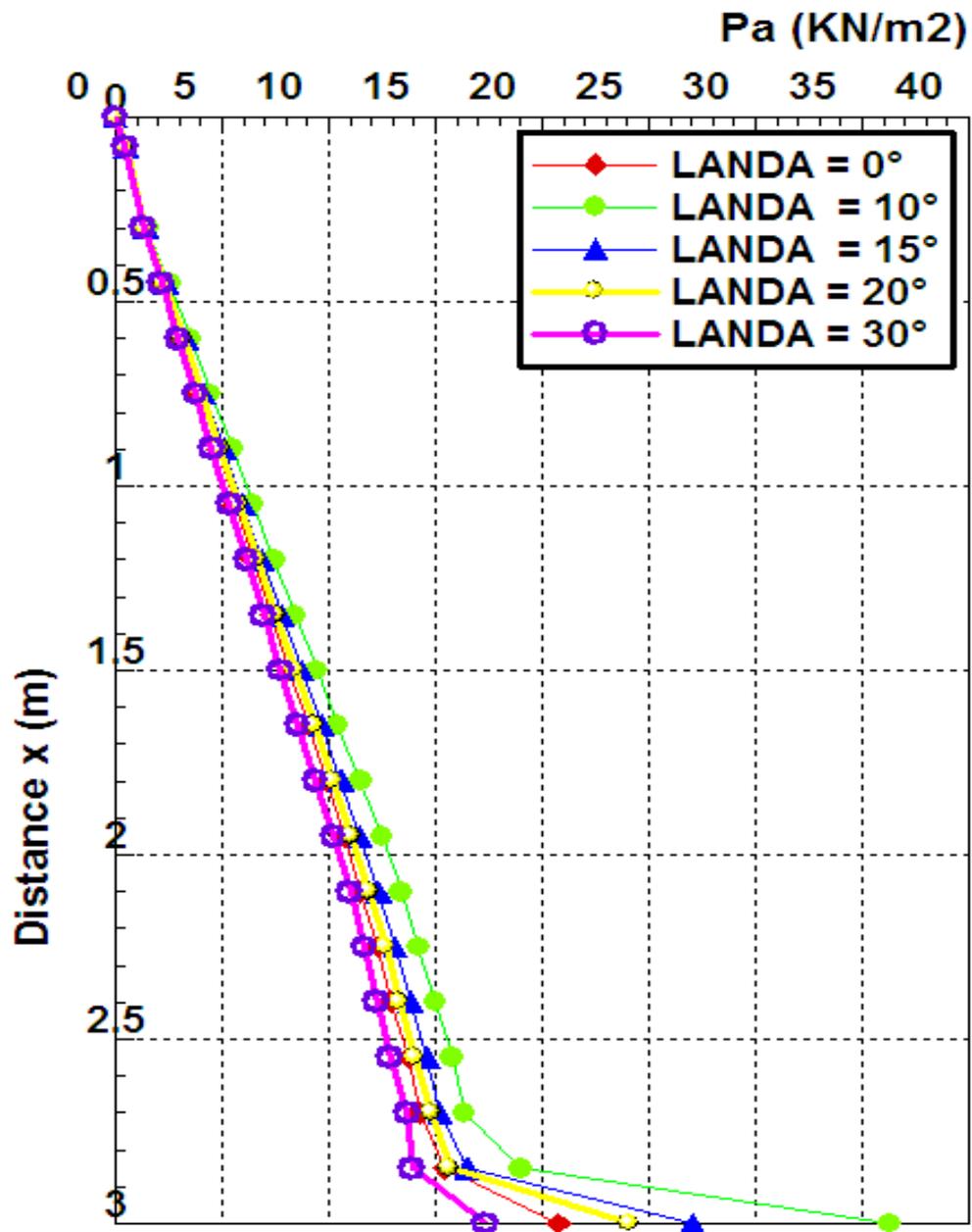


Figure 4-9b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Paroi-sol (δ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \phi = 30^\circ$
Cas de rotation par rapport à la base

4-1-4-2-2-2 Discussion :

- La figure 4-9a montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **rotation par rapport à la base** d'un écran rigide est

§ Parfaitement triangulaire si $\varphi \leq 20^\circ$

§ Triangulaire avec une augmentation brusque de la pression uniquement à la base proche du centre de rotation pour $\varphi > 20^\circ$

Un effet remarquable de l'augmentation de l'angle φ sur les pressions de terre, tant *que* φ augmente la pression active agissant sur le mur diminue.

- La figure 4-9b montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **rotation par rapport à la base** d'un écran rigide est linéaire avec une augmentation brusque de la pression uniquement à la base proche du centre de rotation, on note un effet très faible de l'augmentation de l'angle δ sur les pressions.

4-1-4-2-3 Cas de rotation par rapport au sommet :

La figure 4-10, montre la variation de la force horizontale active en fonction de la rotation par rapport au sommet de l'écran rigide et rugueux par rapport au sommet $\delta = \varphi = \psi = 20^\circ$.

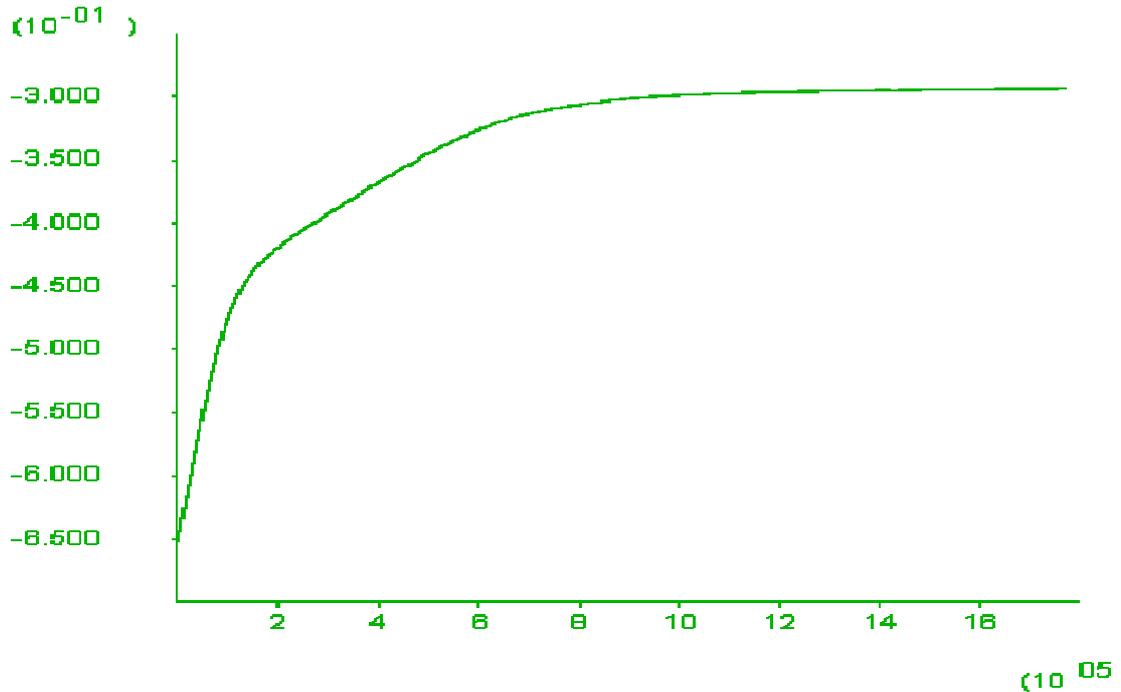


Figure 4-10- Montre la variation de la force horizontale active en fonction de la rotation par rapport au sommet de l'écran rigide et rugueux $\delta = \varphi = \psi = 20^\circ$

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-1) à (4-7) permet d'établir les observations suivantes :

- Les valeurs du coefficient actif de la terre K_a obtenues numériquement (FLAC 2D) sont très proches de celles de Bouali Meriem Fakhreddine avec une différence n'excédant pas 9.1% sauf $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$ on observe une grande différence.

4-1-4-2-3-1 Distribution de la pression active de terre contre l'écran :

Les figures 4-11a, 4-11b, présentent le changement de la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

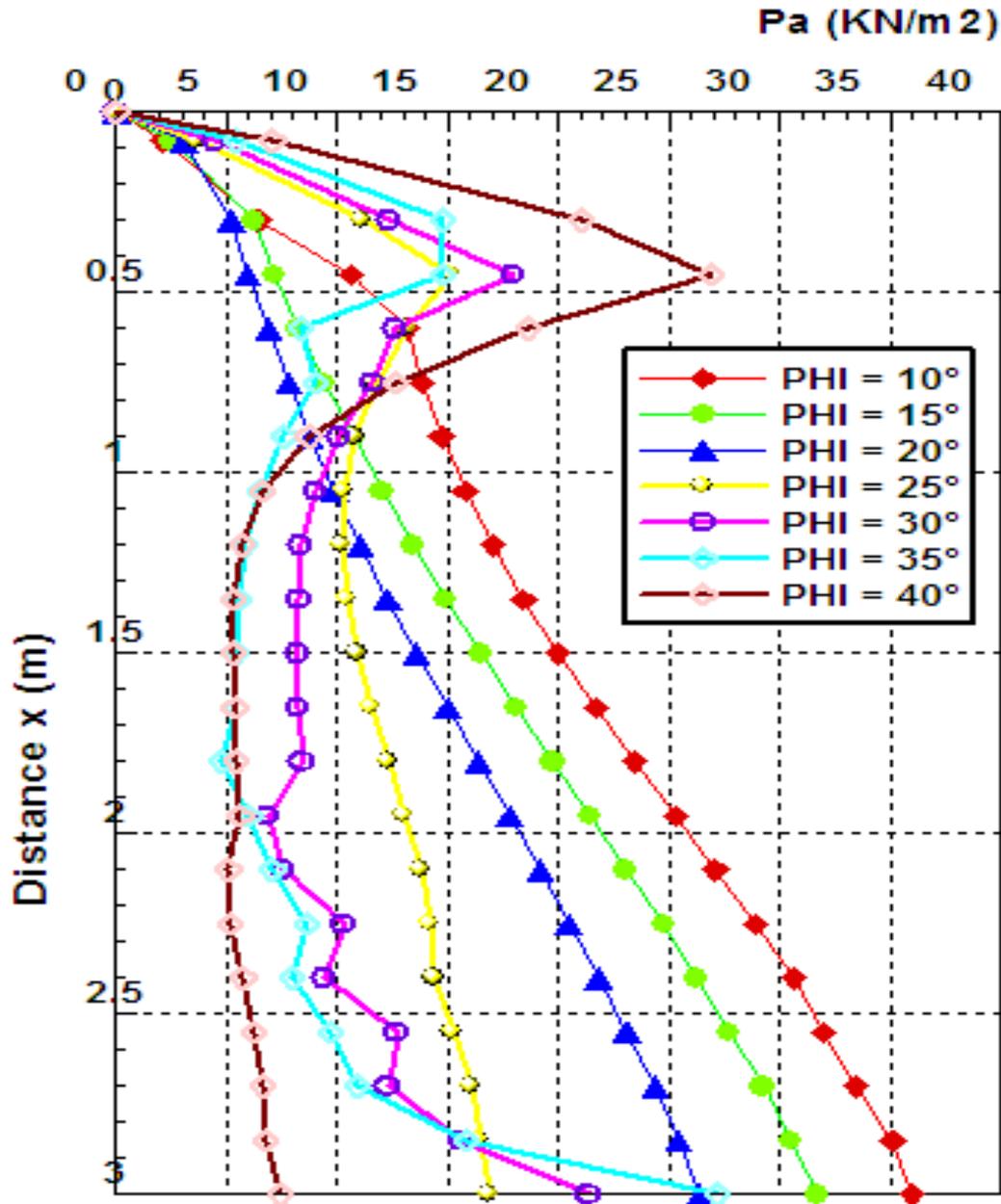


Figure 4-11a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran lisse $\delta = 0^\circ$ et rigide avec $\psi = \varphi$
Cas de rotation par rapport au sommet

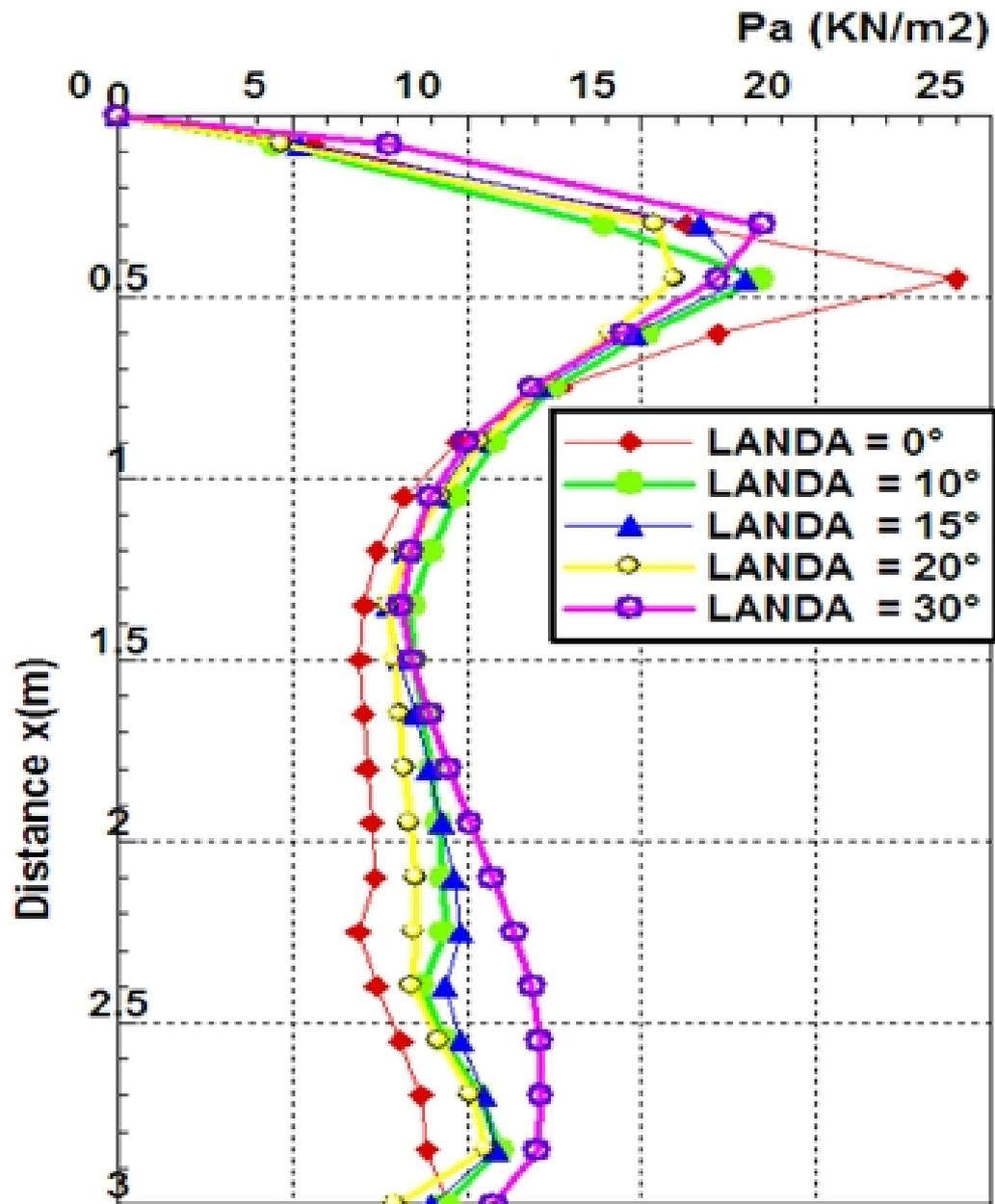


Figure 4-11b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Paroi-sol (δ) sur la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \varphi = 30^\circ$
Cas de rotation par rapport au sommet

4-1-4-2-3-2 Discussion :

- La figure 4-11a montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **rotation par rapport au sommet** d'un écran rigide est
 - § Légèrement triangulaire si $\varphi \leq 20^\circ$
 - § Non linéaire avec une concentration des contraintes au sommet de l'écran
- La figure 4-11b montre que la distribution de la pression active de terre calculée à partir de logiciel FLAC 2D en cas de **rotation par rapport au sommet** d'un écran rigide est non linéaire avec une concentration des contraintes au sommet de l'écran

4-1-4-3 Pression passive de terre (K_p) :

Les différentes valeurs du coefficient passif de la terre K_p pour les différents modes de mouvement, présentées ci-dessus, sont regroupées dans les tableaux (4-8) à (4-14) pour des raisons de comparaison avec quatre solutions existantes de Coulomb-Rankine (1776), Caquot-Kérisel (1948), Soubra (2000), Soubra-Macuh (2002).

I-4-4-4 Évaluation de la pression passive (k_p) de la terre contre l'écran:

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux 4-8 à 4-14 permet d'établir les interprétations suivantes :

Les tableaux montrent l'augmentation du coefficient passif de la terre (K_p) quelle que soit le mode de mouvement avec :

- **L'augmentation de l'angle de frottement de sol φ** : quelque soient les valeurs des angles de frottement sol-paroi $\delta = (0, 1/2, 1/3, 2/3, 1) \varphi$ ou les valeurs des angles de dilataance du sol $\psi = (0, 1, 1/2) \varphi$.
- **L'augmentation de l'angle de frottement sol-paroi δ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement du sol φ ou les valeurs des angles de dilataance du sol $\psi = (0 ; 1 ; 1/2) \varphi$.
- **L'augmentation de l'angle de dilataance du sol ψ** : quelles que soient les valeurs des angles de frottement du sol φ ou les valeurs des angles de frottement sol-paroi $\delta = (0, 1/2, 1/3, 2/3, 1) \varphi$

Un effet plus significatif d'angle ψ sur la valeur du coefficient passif de la terre (K_p) uniquement pour les sols présentant un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$), et un angle de frottement paroi-sol $\delta = (20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ)$. Alors que son influence est pratiquement négligeable pour $\varphi = (10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ)$ et $\delta = (0^\circ, 5^\circ, 10, 15^\circ)$.

On constate que l'effet de la variation de l'angle de frottement de l'interface paroi-sol δ sur le coefficient passif de la terre est décroissant uniquement pour les sols présentant un faible angle de frottement ($\varphi = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$) et $\delta = (0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ)$, et croissant pour les sols présentant un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 40^\circ$) et $\delta = 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ$.

L'effet de la variation de l'angle de frottement du sol φ sur le coefficient passif de la terre est décroissant.

L'effet de l'angle de frottement interne φ est plus significatif que les deux autres effets étudiés (effet de l'angle de frottement de l'interface paroi-sol δ et l'effet de l'angle de dilatance ψ) pour les trois modes de mouvement translation, rotation par rapport à la base et rotation par rapport au sommet.

Les valeurs données par Coulomb s'éloignent au-delà de $\varphi = 30^\circ$

4-1-4-5-1 Cas de translation :

La figure 4-12, montre la variation de la force horizontale passive en fonction de translation horizontale de l'écran rigide avec $\delta = 0^\circ$ et $\varphi = \psi = 35^\circ$.

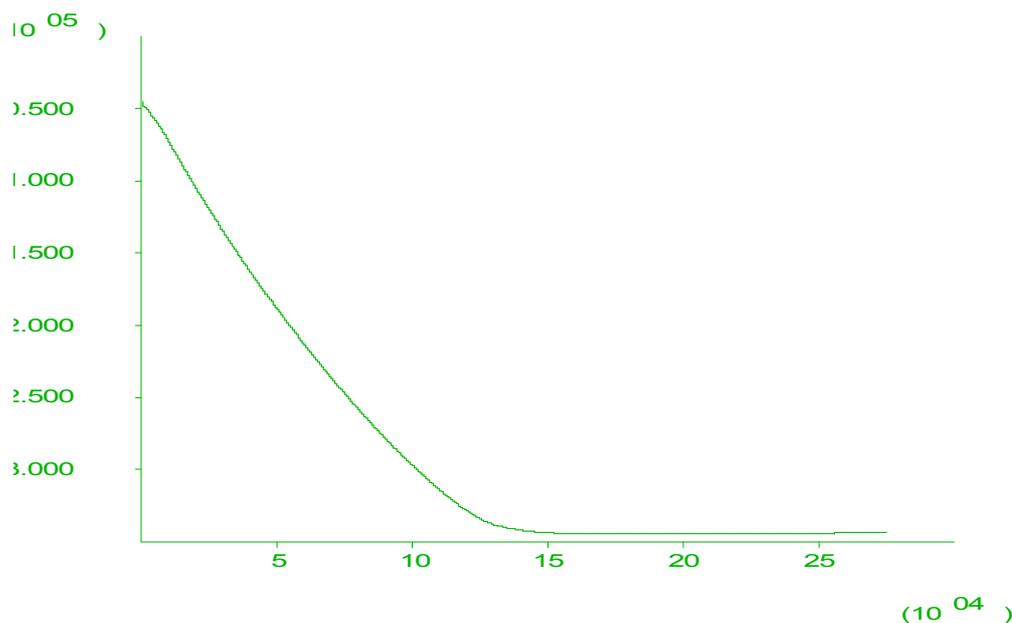


Figure 4-12- Montre la variation de la force horizontale passive en fonction du déplacement horizontal de l'écran rigide $\delta = 0^\circ$ et $(\varphi = \psi = 35^\circ)$

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-8) à (4-14) permet d'établir les observations suivantes :

- Les valeurs du coefficient passif de la terre K_p obtenues numériquement (FLAC 2D) **en cas de translation d'un écran lisse et rigide** sont en parfait accord avec les valeurs actuellement utilisées de Caquot–Kérisel quel que soit l'angle de frottement du sol φ .
- Les valeurs du coefficient passif de la terre K_p obtenues numériquement (FLAC 2D) **en cas de translation d'un écran rugueux et rigide** sont en parfait accord avec les valeurs actuellement utilisées de Caquot–Kérisel pour les sols présentant un faible angle de frottement $\varphi < 30^\circ$.
- Pour les sols présentant un fort angle de frottement $\varphi > 30^\circ$, les valeurs obtenues numériquement (FLAC 2D) pour le mode de translation horizontal d'écran d'un écran rugueux et rigide sont inférieures aux solutions données par Caquot–Kérisel mais elles ne sont pas très éloignées alors que la différence est remarquable avec les valeurs données par Coulomb-Rankine.

FLAC 2D présente une différence avec

Caquot–Kérisel n'excédant pas 18 % **pour. $\varphi = \psi = \delta = 40^\circ$**

Coulomb-Rankine n'excédant pas 82 % **pour. $\varphi = \psi = \delta = 40^\circ$**

- Lorsque $\varphi \leq 30^\circ$ les valeurs du coefficient passif de la terre K_p obtenues numériquement (FLAC 2D) pour le mode de translation horizontal d'écran sont en parfait accord avec les valeurs de Soubra et de Soubra-Macuh avec une différence n'excédant pas 6.49 % pour $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$ et lorsque $\varphi > 30^\circ$ sont inférieures bondissent des solutions de Soubra et de Soubra-Macuh de façon très remarquable.
- Pour le mode de mouvement (T), les résultats de simulation pour les différentes valeurs des angles (δ, φ, ψ) donnent des valeurs proches à celles de Bouali Meriem Fakhreddine FLAC 2D et présentent une différence n'excédant pas 2.70 % pour $\varphi = \psi = \delta = 30^\circ$

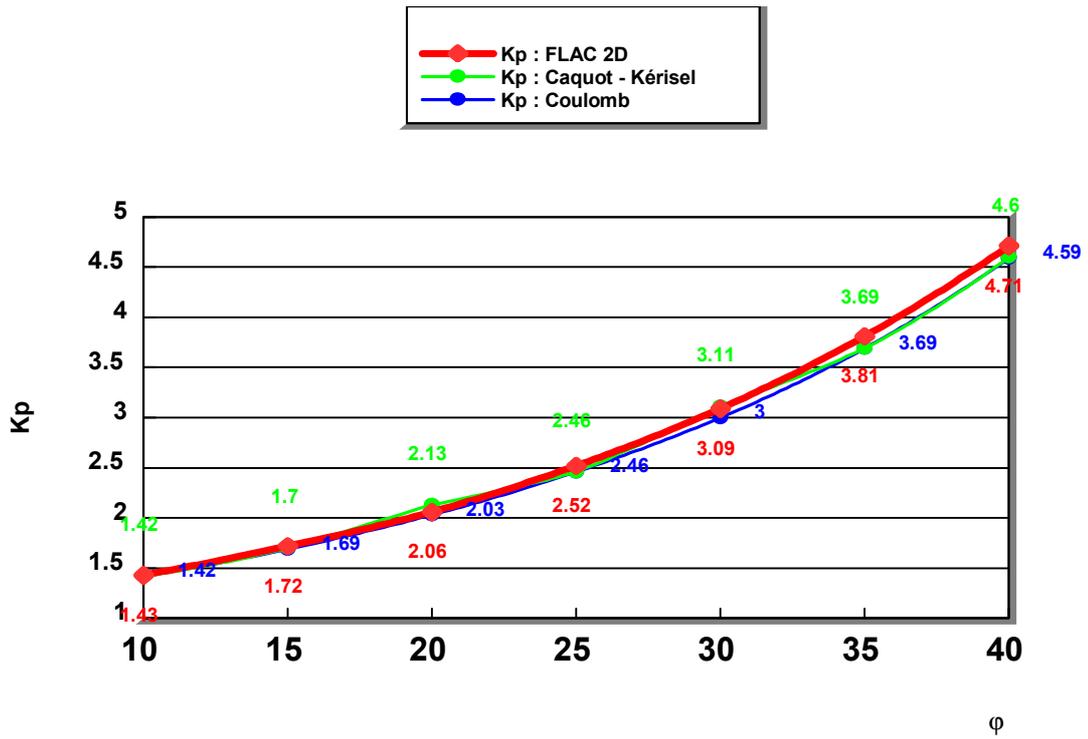


Figure 4-13a Cas de translation avec $\phi = \psi$, et $\delta = 0^\circ$

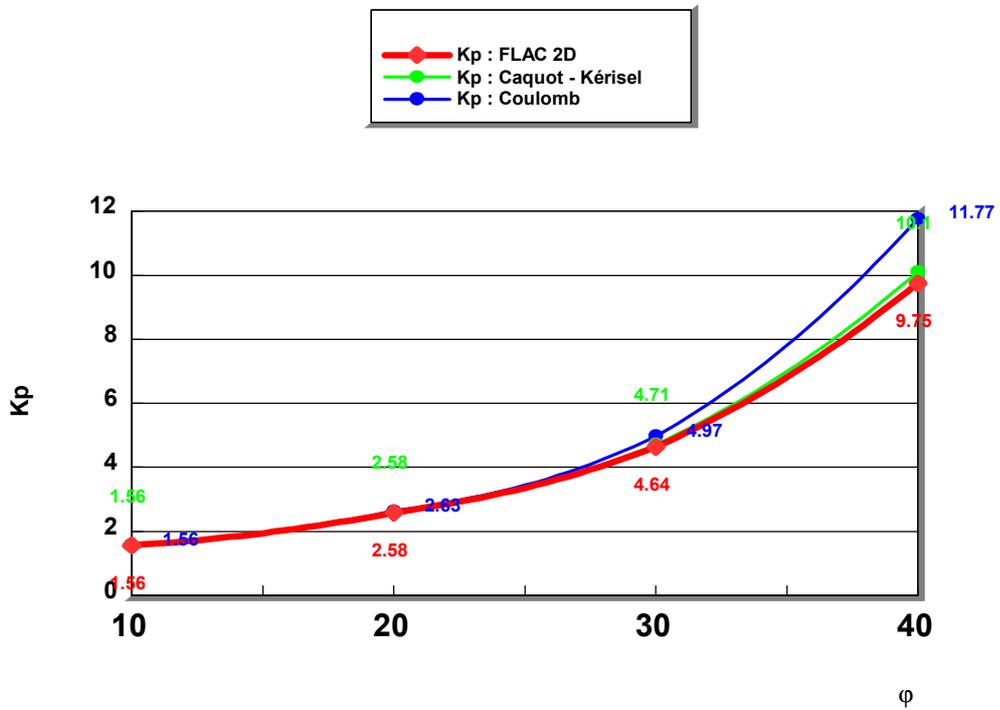


Figure 4-13b- Cas de translation avec $\phi = \psi$, et $\delta = 1/2 \phi$

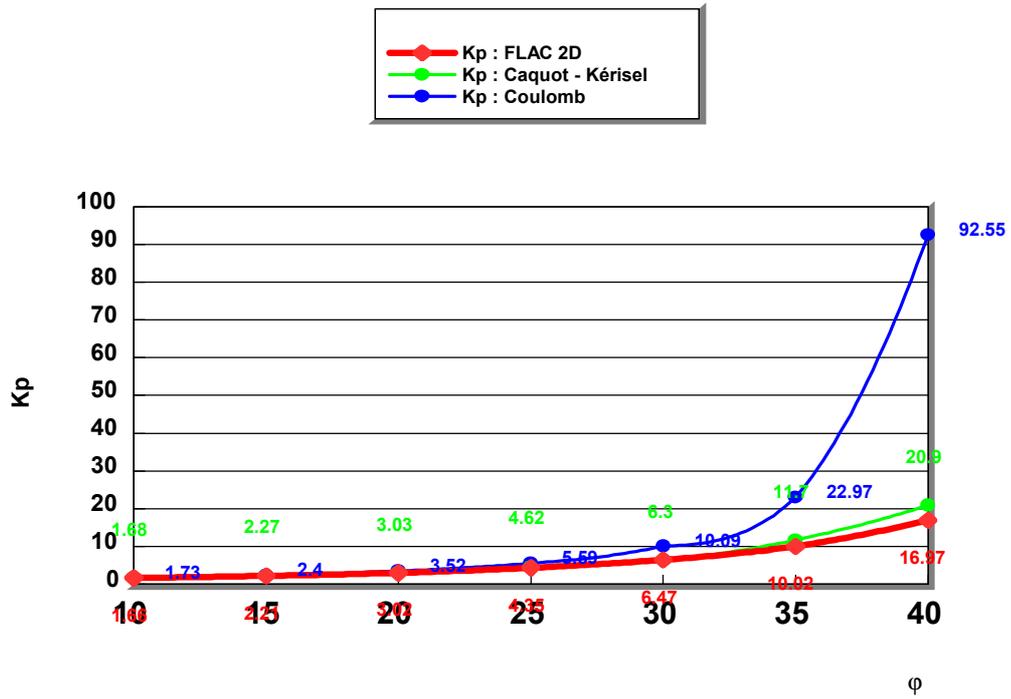


Figure 4-13c Cas de translation avec $\phi = \psi = \delta$

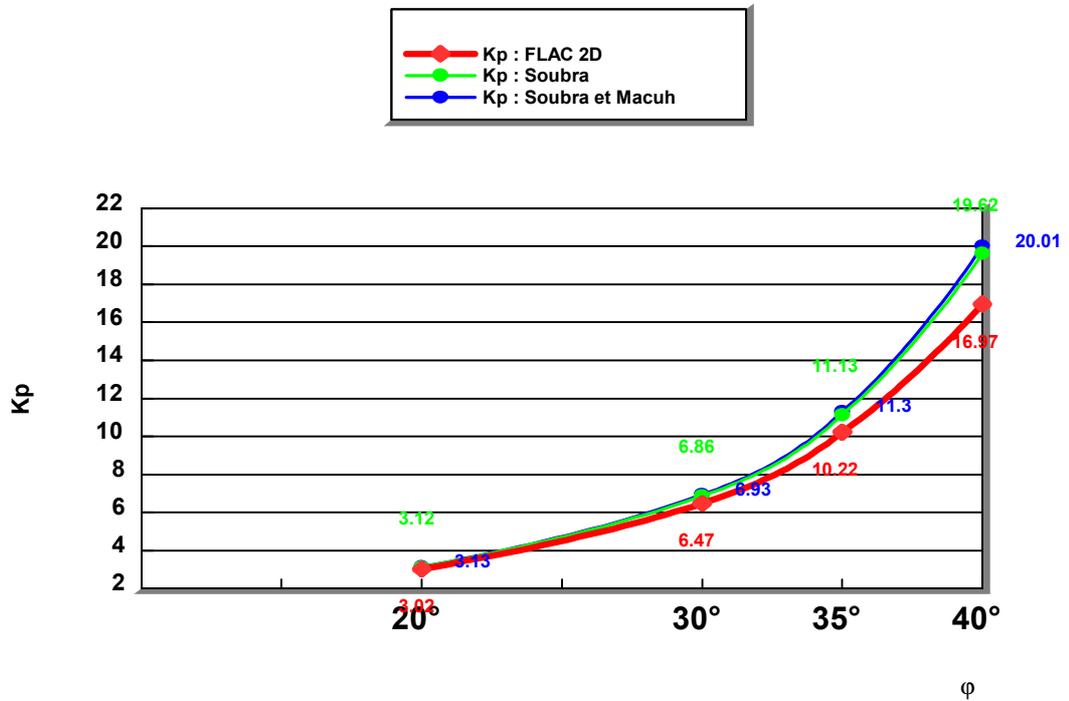


Figure 4-13d Cas de translation avec $\phi = \psi = \delta$

4-1-4-5-1-1 Distribution de la pression passive de terre contre l'écran :

Les figures 4-14a, 4-14b, présentent le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

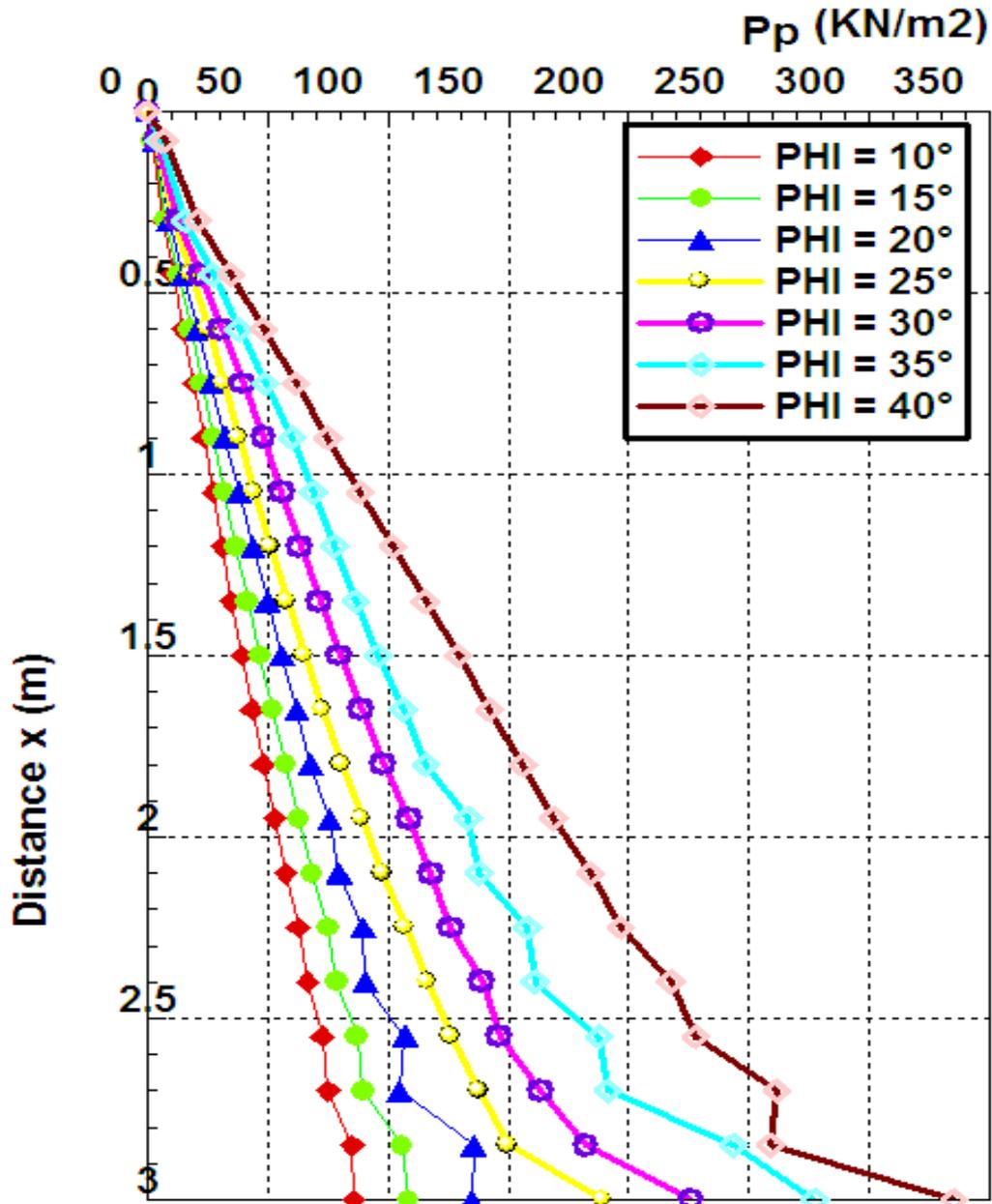


Figure 4-14a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \varphi$
Cas de translation

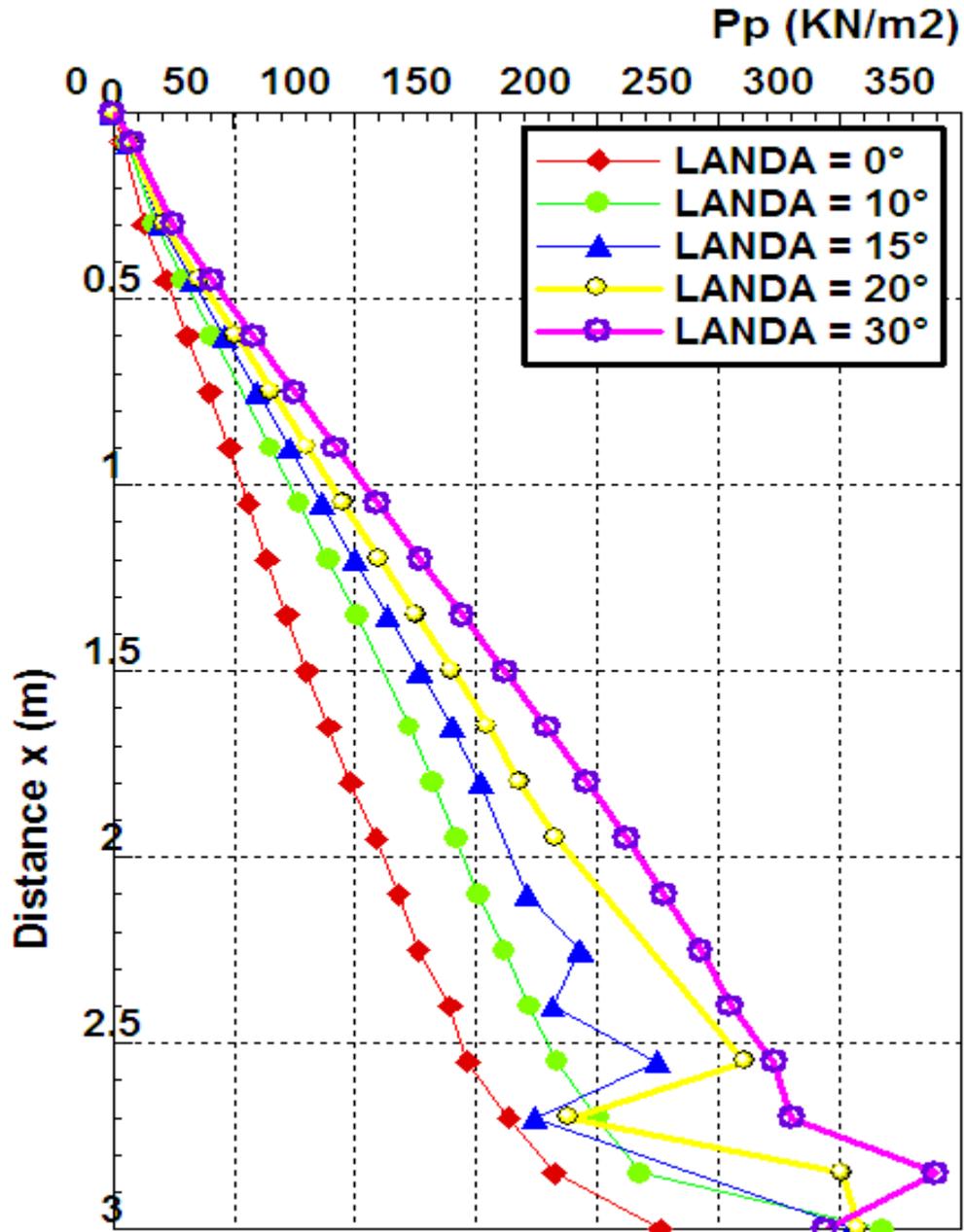


Figure 4-14b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Sol-paroi δ sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \phi = 30^\circ$
Cas de translation

4-1-5-1-2 Discussion :

- La figure 4-14a montre que la distribution des pressions passives pour la **translation horizontale** est linéaire, avec un effet remarquable de l'augmentation de l'angle φ sur les pressions de terre, tant que φ augmente la pression passive agissant sur le mur augmente.
- La figure 4-14b montre que la distribution des pressions passive pour la **translation horizontale** est linéaire sauf une courbure observée près de la base d'écran, avec un effet remarquable de l'augmentation de l'angle δ sur les pressions de terre, tant que δ augmente la pression passive agissant sur le mur augmente.

4-1-4-5-2 Cas de rotation par rapport à la base :

La figure 4-15, montre la variation de la force horizontale passive en fonction de la rotation par rapport à la base de l'écran rigide avec $\delta = 0^\circ$, et $\varphi = \psi = 35^\circ$.

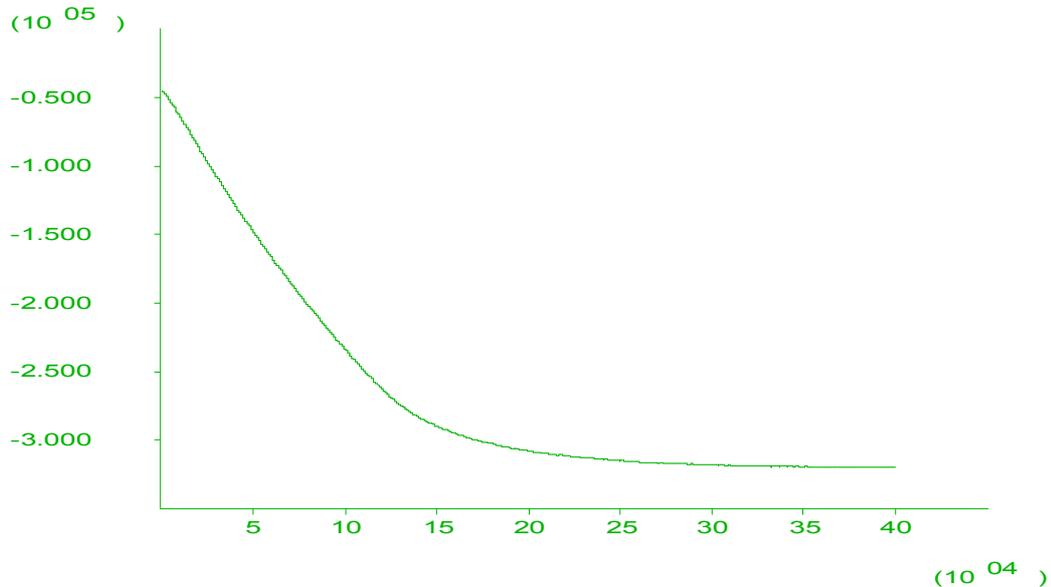


Figure 4-15- Montre la variation de la force horizontale passive en fonction de rotation par rapport à la base de l'écran rigide $\delta = 0^\circ$, et ($\varphi = \psi = 35^\circ$)

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-8) à (4-14) permet d'établir les observations suivantes :

- Pour le mode de mouvement **(RB)**, les résultats de simulation pour les différentes valeurs des angles (δ, φ, ψ) donnent des valeurs proches de celles de Bouali Meriem Fakhreddine FLAC 2D et présentent une différence n'excédant pas 4.37 % pour $\psi = 30^\circ$ et $\delta = 0^\circ$

I-4-4-5-2-1 Distribution de la pression passive de terre contre l'écran :

Les figures 4-16a, 4-16b, présentent le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

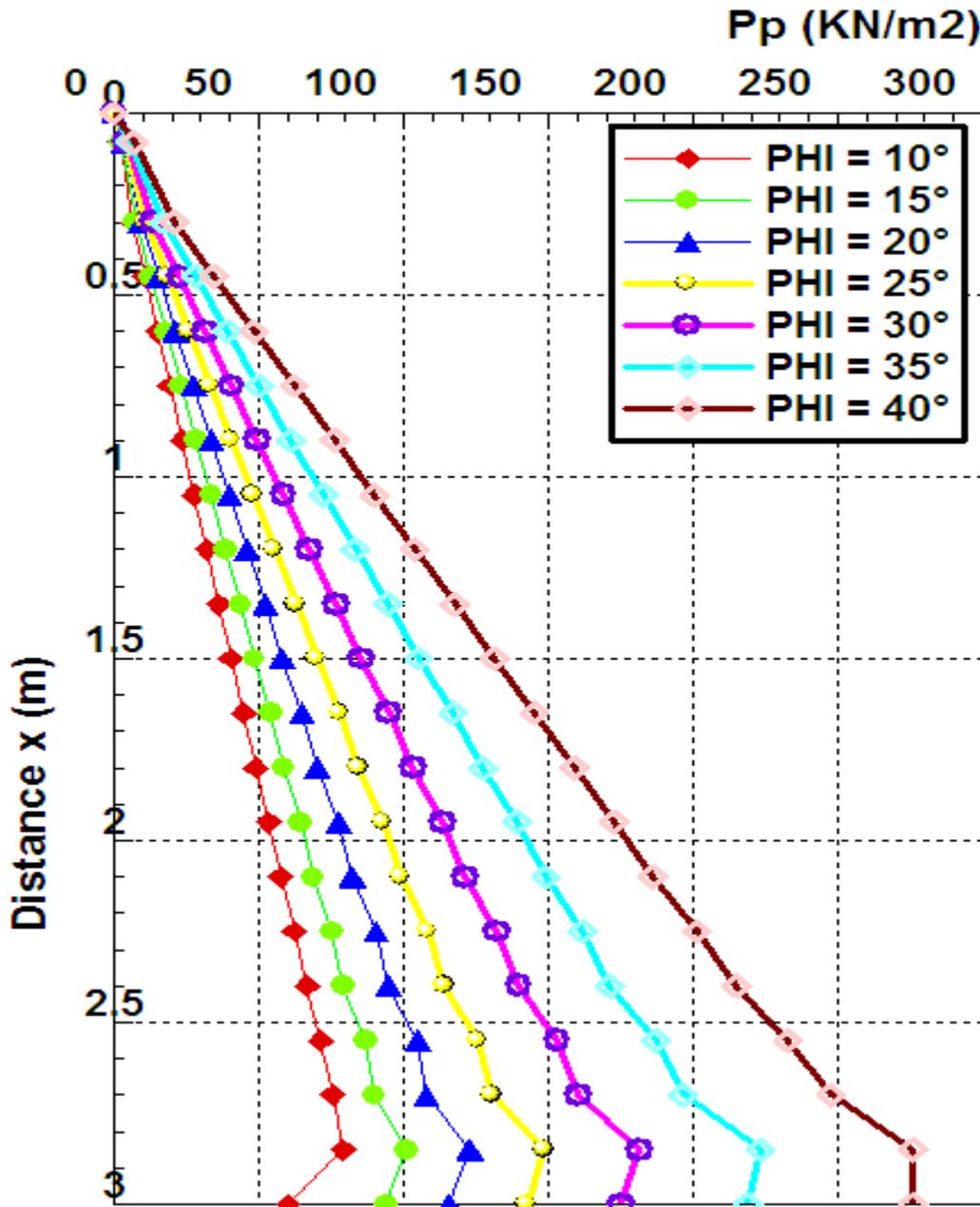


Figure 4-16a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \varphi$
Cas de rotation par rapport à la base

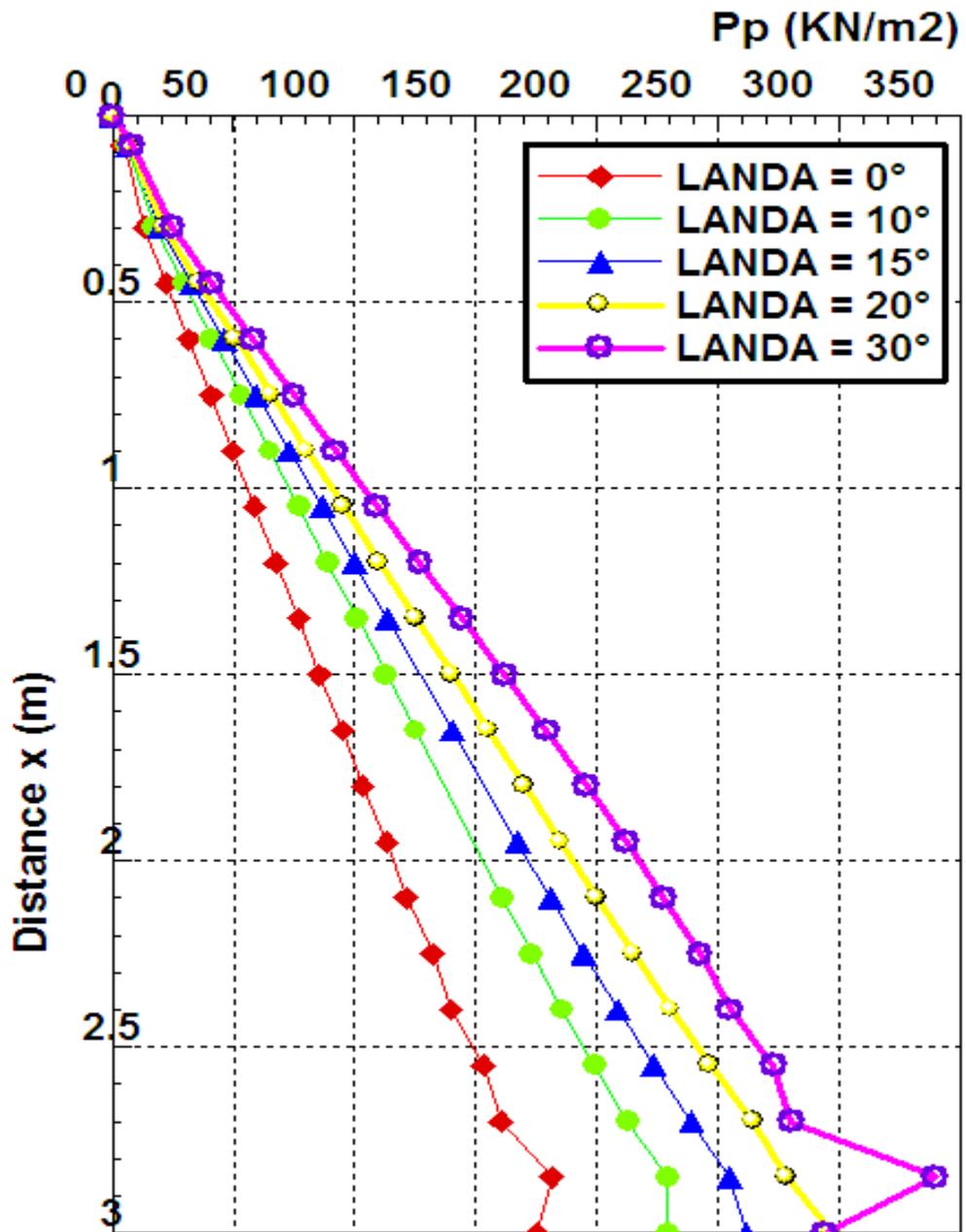


Figure 4-16b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Sol-paroi δ sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ Cas de rotation par rapport à la base

4-1-4-5-2-2 Discussion :

- La figure 4-16a montre que la distribution des pressions passives est linéaire avec un effet remarquable de l'augmentation de l'angle ϕ sur les pressions de terre, tant que ϕ augmente la pression passive agissant sur le mur augmente.
- La figure 4-16b montre que la distribution des pressions passive est linéaire avec un effet de l'augmentation de l'angle δ sur les pressions de terre, tant que δ augmente la pression passive agissant sur le mur augmente.

4-1-4-5-3 Cas de rotation par rapport au sommet ;

La figure 4-17, montre la variation de la force horizontale passive en fonction de rotation par rapport au sommet de l'écran rigide avec $\delta = 0^\circ$, $\varphi = \psi = 35^\circ$.

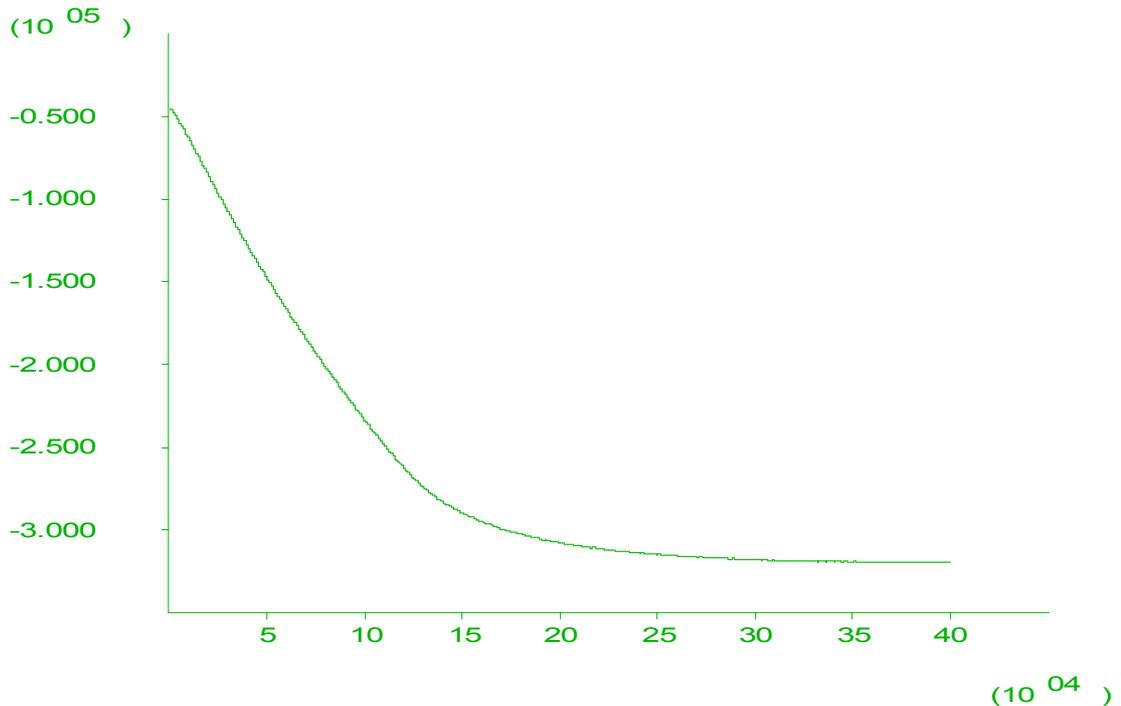


Figure 4-17- Montre la variation de la force horizontale passive en fonction de la rotation par rapport au sommet de l'écran rigide $\delta = 0^\circ$, $\varphi = \psi = 35^\circ$

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-8) à (4-14) permet d'établir les observations suivantes :

- Pour le mode de mouvement (**RS**), les résultats de simulation pour les différentes valeurs des angles (**δ , φ , ψ**) donnent des valeurs proches de celles de Bouali Meriem Fakhreddine. FLAC 2D est présentement une différence n'excédant pas 6.52 % pour $\varphi = \psi = 30^\circ$ et $\delta = 0^\circ$

4-1-4-5-3-1 Distribution de la pression passive de terre contre l'écran :

Les figures 4-18a, 4-18b, présentent le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide en fonction du changement de φ avec $\delta = 0^\circ$, $\psi = \varphi$ et en fonction du changement de l'angle de l'interface δ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$ respectivement.

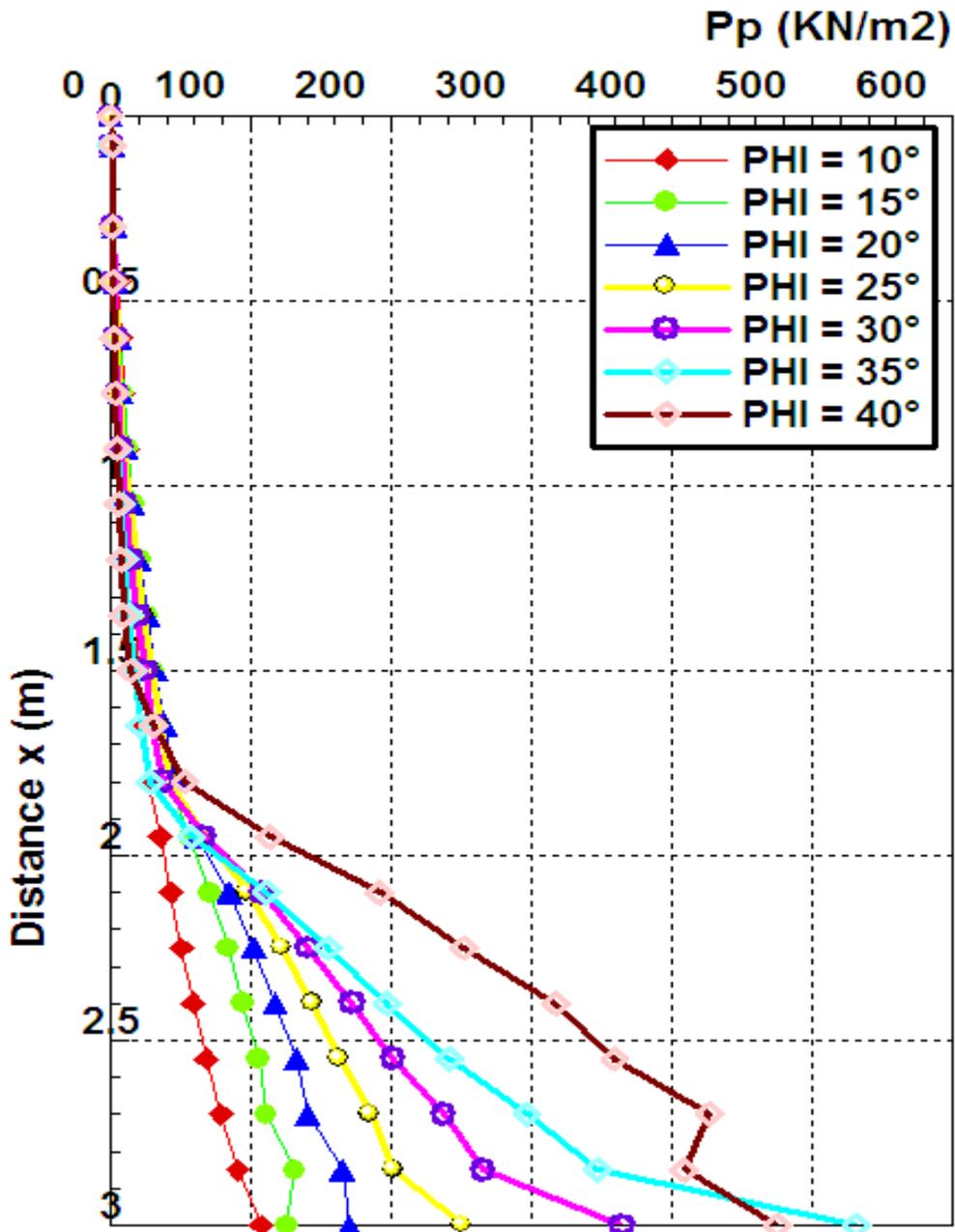


Figure 4-18a- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement interne du sol (φ) sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \varphi$
Cas de rotation par rapport au sommet

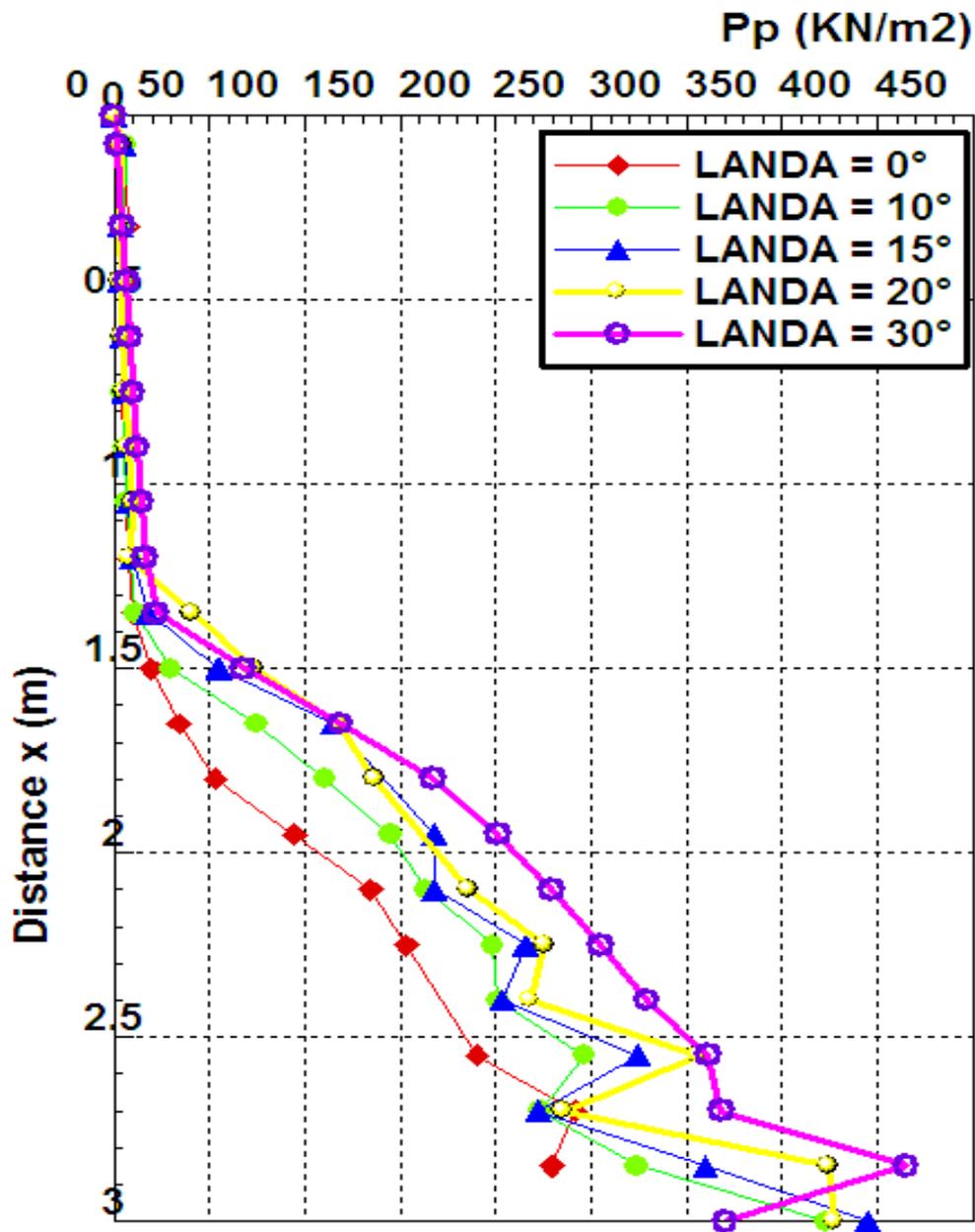


Figure 4-18b- Présente l'effet du changement de l'angle de frottement De l'interface Sol-paroi δ sur la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide avec $\psi = \varphi = 30^\circ$
Cas de rotation par rapport au sommet

4-1-4-5-3-2 Discussion :

- Les deux figures 4-18a et 4-18b montrent que dans le cas de **rotation par rapport au sommet** la butée présente un état de pression au repos sur moins de 50% de la hauteur de l'écran comptée à partir du sommet.

4-1-5 Comparaison entre les trois modes étudiés (T, RB, RS):

4-1-5-1 Les zones mobilisées par la butée et la poussée :

Afin de visualiser la zone mobilisée par la butée et la poussée, nous présentons sur les figures 4-19a, 4-19b, 4-19c, les champs de déplacements maximaux pour les trois modes de mouvement T, RB, RS respectivement avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ et $\delta = 0^\circ$.

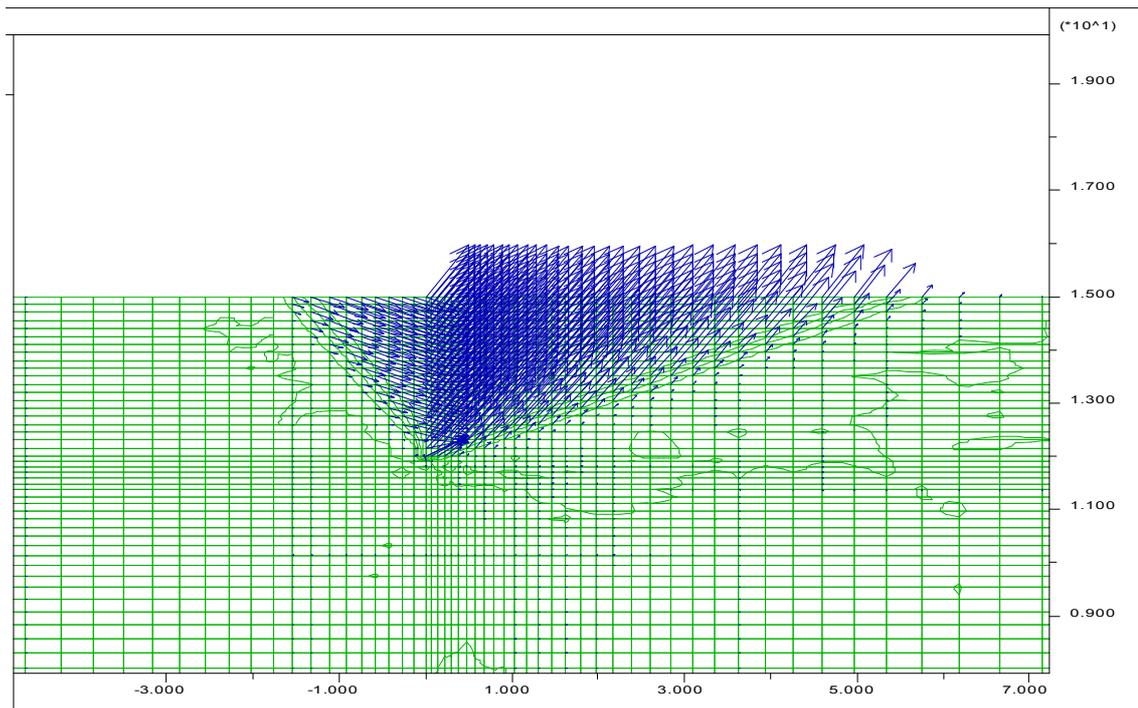


Figure 4-19a- Montre le champ de déplacement maximal pour le mode de translation

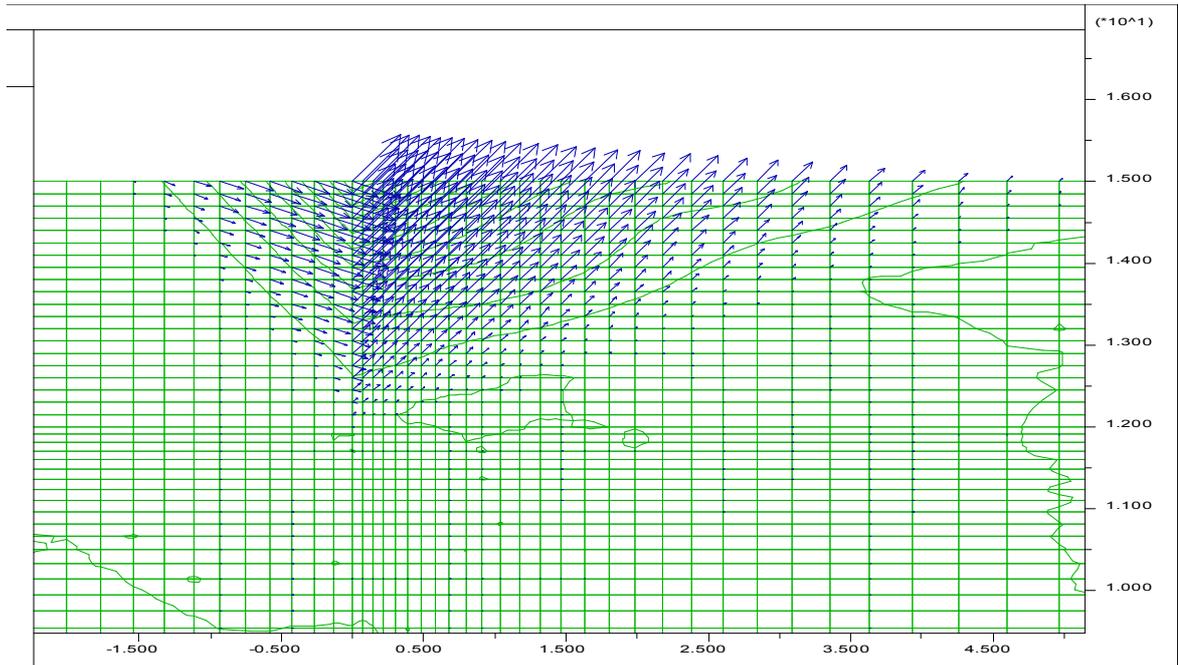


Figure 4-19b- Montre le champ de déplacement maximal pour le mode de rotation par rapport à la base

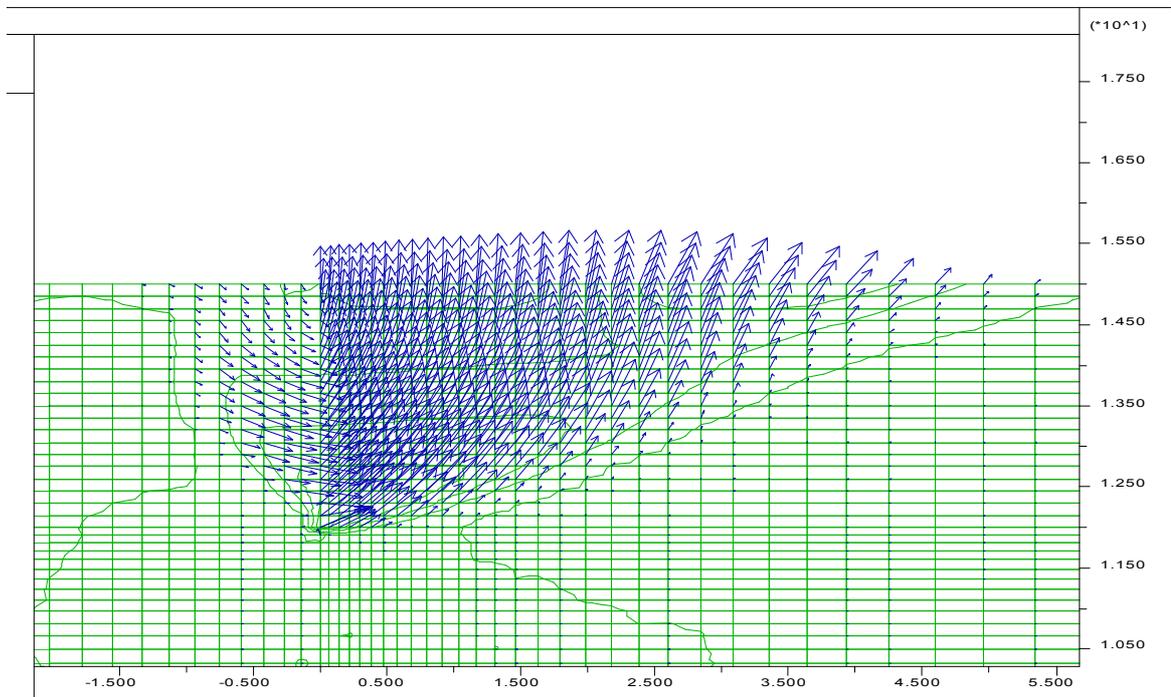


Figure 4-19c- Montre le champ de déplacement maximal pour le mode de rotation par rapport au sommet

4-1-5-2 Les zones plastifiées par la butée et la poussée :

Afin de visualiser la zone plastifiées par la butée et la poussée, nous présentons sur les figures 4-20a, 4-20b, 4-20c, les zone plastifiées pour les trois modes de mouvement T, RB, RS respectivement avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ et $\delta = 0^\circ$.

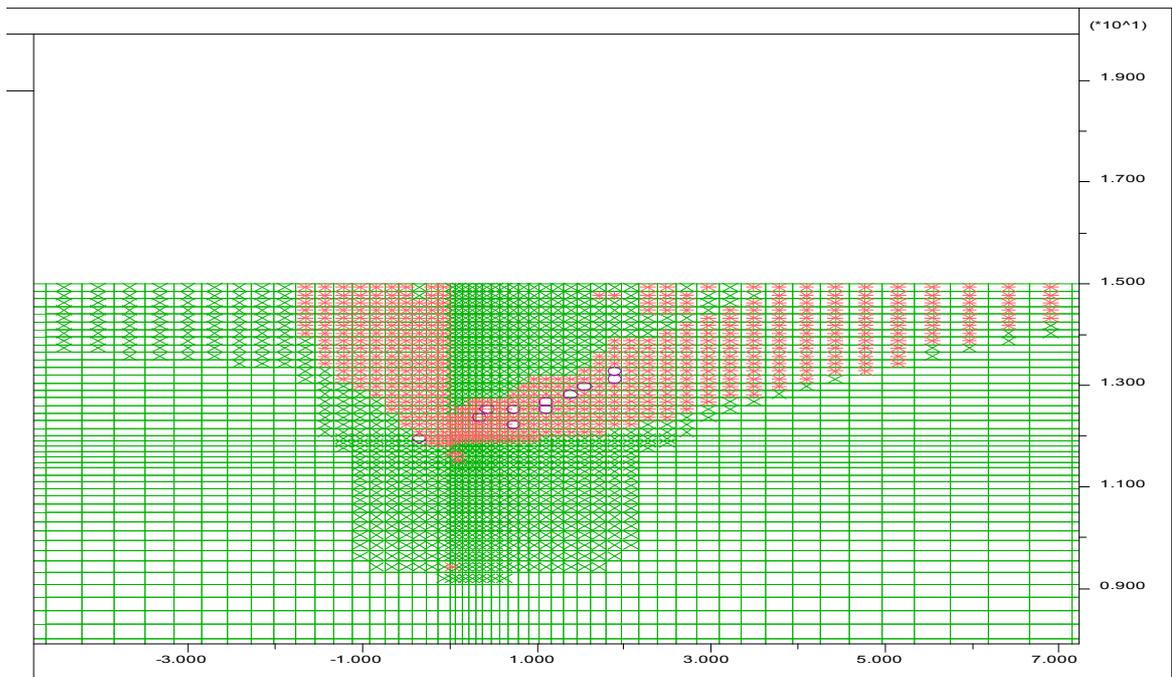


Figure 4-20c- Montre la zone plastifiée par la poussée et la butée pour le mode de translation

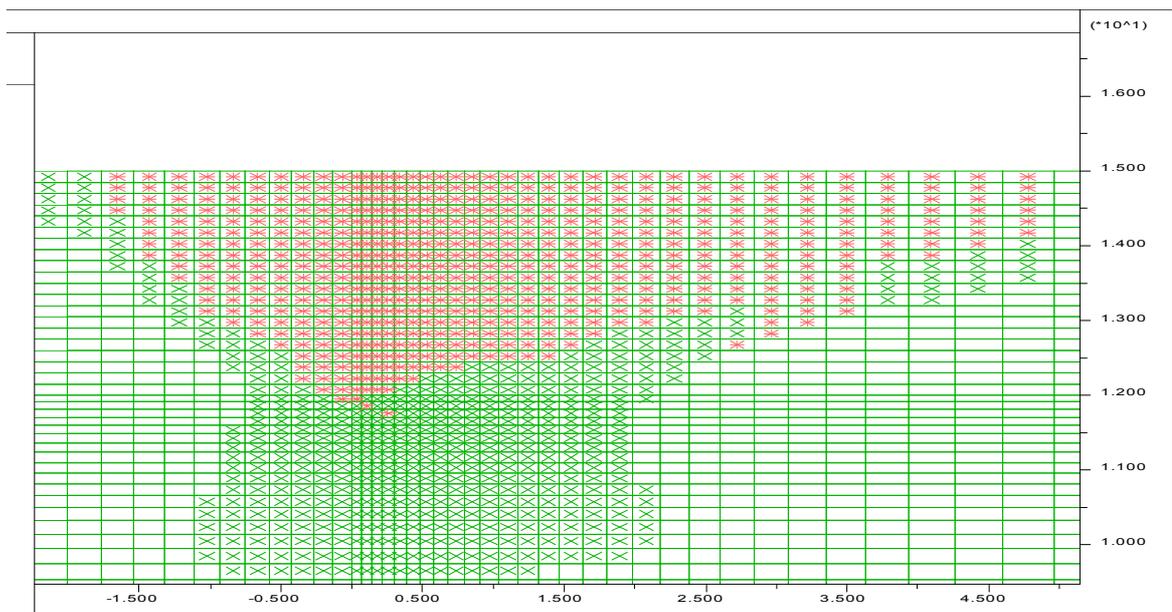


Figure 4-20b- Montre la zone plastifiée par la poussée et la butée pour le mode de rotation par rapport à la base

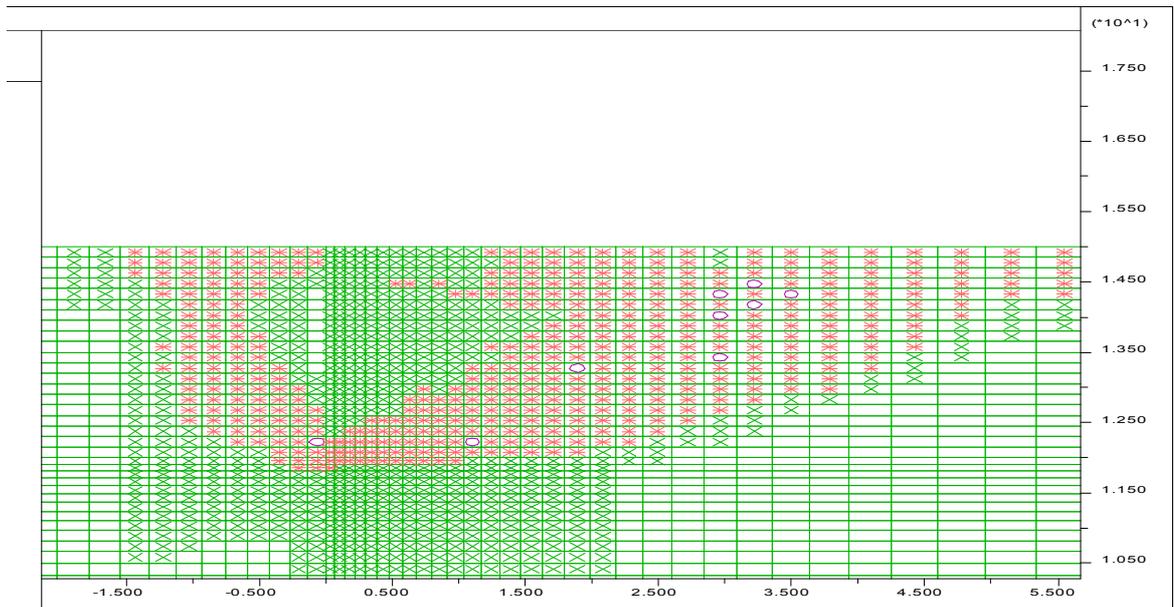


Figure 4-20c- Montre la zone plastifiée par la poussée et la butée pour le mode de rotation par rapport au sommet

4-1-5-3 discussion :

Les figures 4-19a, 4-19b et 4-19c montrent pour $\delta = 0^\circ$ avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ la visualisation du champ de déplacement pour trois modes de mouvements (**T**, **RB**, **RS**) respectivement.

Ces figures montrent clairement les zones mobilisées par la butée et la poussée visualisées par la concentration des vecteurs de déplacements, la surface de rupture est similaire à la surface plane proposée par Rankine délimitant un prisme triangulaire.

4-1-5-4 Coefficient de poussée K_a :

L'analyse des résultats de simulation présentés dans le tableau (4-1) à (4-7) permet d'établir les interprétations suivantes :

- Le mode T (translation) possède le plus faible coefficient de pression active, ensuite vient le mode RB (rotation par rapport à la base) et RS (rotation par rapport au sommet) qui possède le plus grand coefficient de pression active.
- On peut observer que lorsque $\psi = \delta = 0$ les valeurs de coefficient actif de la terre K_a de mode de translation sont très proches aux valeurs de mode de rotation par rapport à la base de l'écran quelles que soient les valeurs de φ .
- La translation (T) et la rotation par rapport à la base (RB) qui ont presque les mêmes coefficients (l'écart ne dépasse pas 7%).
- L'égalité des coefficients des terres actifs des modes T (translation) et rotation par rapport à la base (RB) peut être justifiée par la même nature de distribution des pressions.
- La rotation par rapport au sommet (RS) possède le plus grand K_a (la différence maximale entre K_a de RS et celui de T est de l'ordre de 58% dans le cas où $\varphi = 40^\circ$, $\delta/\varphi = 0^\circ$ et $\psi = 0$).
- On observe que l'influence du mode de mouvement de translation sur l'évaluation de coefficients de pression active de terre a presque le même effet avec que le mode de mouvement de rotation par rapport à la base en cas de la variation de l'angle de frottement interne du sol φ .
- On observe que l'influence du mode de mouvement de translation sur l'évaluation de coefficients de pression active de terre a presque le même effet avec le mode de mouvement de rotation par rapport à la base en cas de la variation de l'angle de frottement de l'interface paroi-sol δ de (0° à φ) et avec $\psi = \varphi$.
- Le mode de mouvement de translation est plus critique que les deux autres modes de mouvements étudiés (RS. RB) respectivement.

4-1-5-4-1 Cas de la distribution de pression active de la terre contre l'écran:

Les figures 4-21a, 4-21b, présentent le changement de la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ en fonction du changement du mode de mouvements (T, RB, RS) avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ et 40° respectivement.

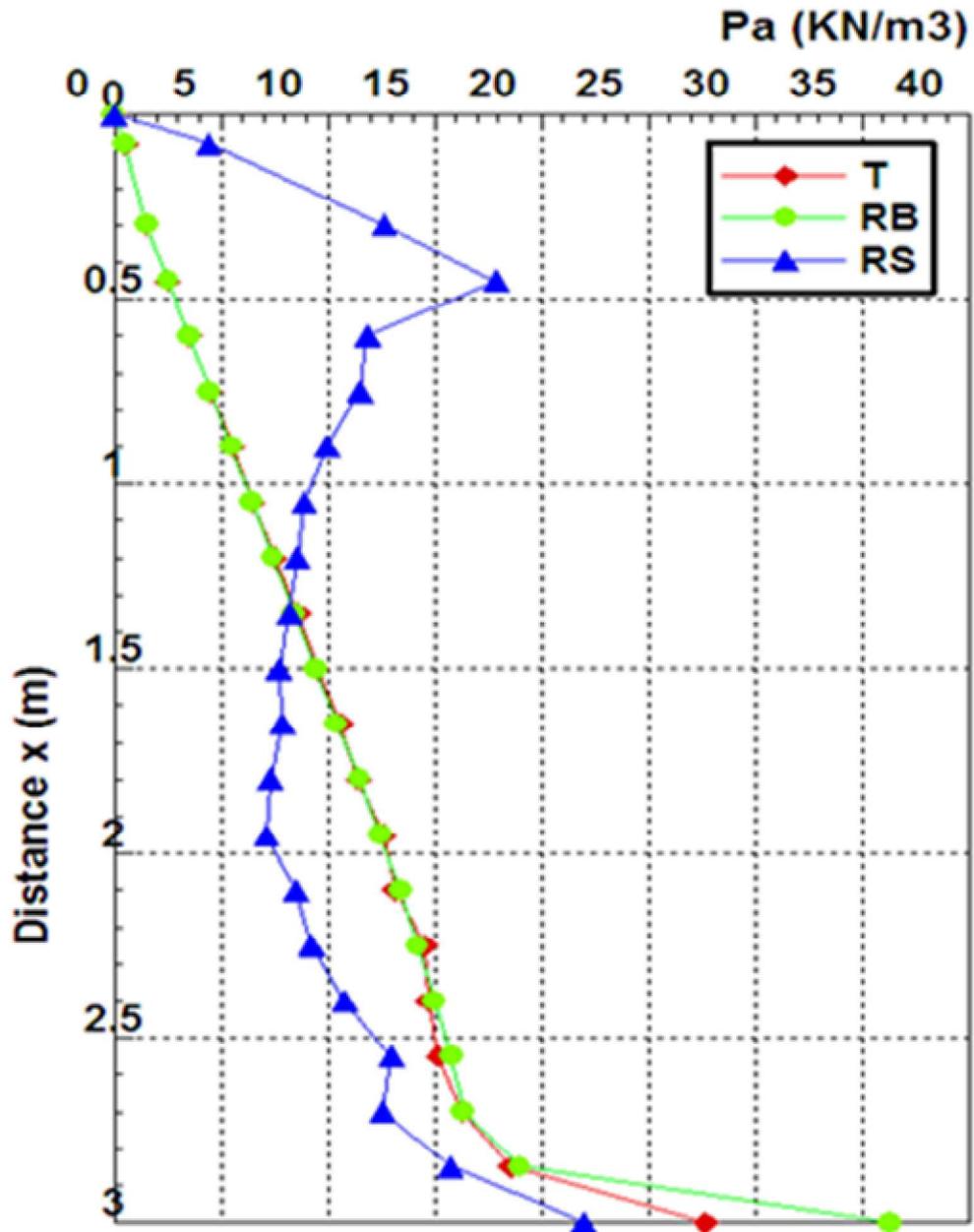


Figure 4-21a- Cas de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \varphi = 30^\circ$

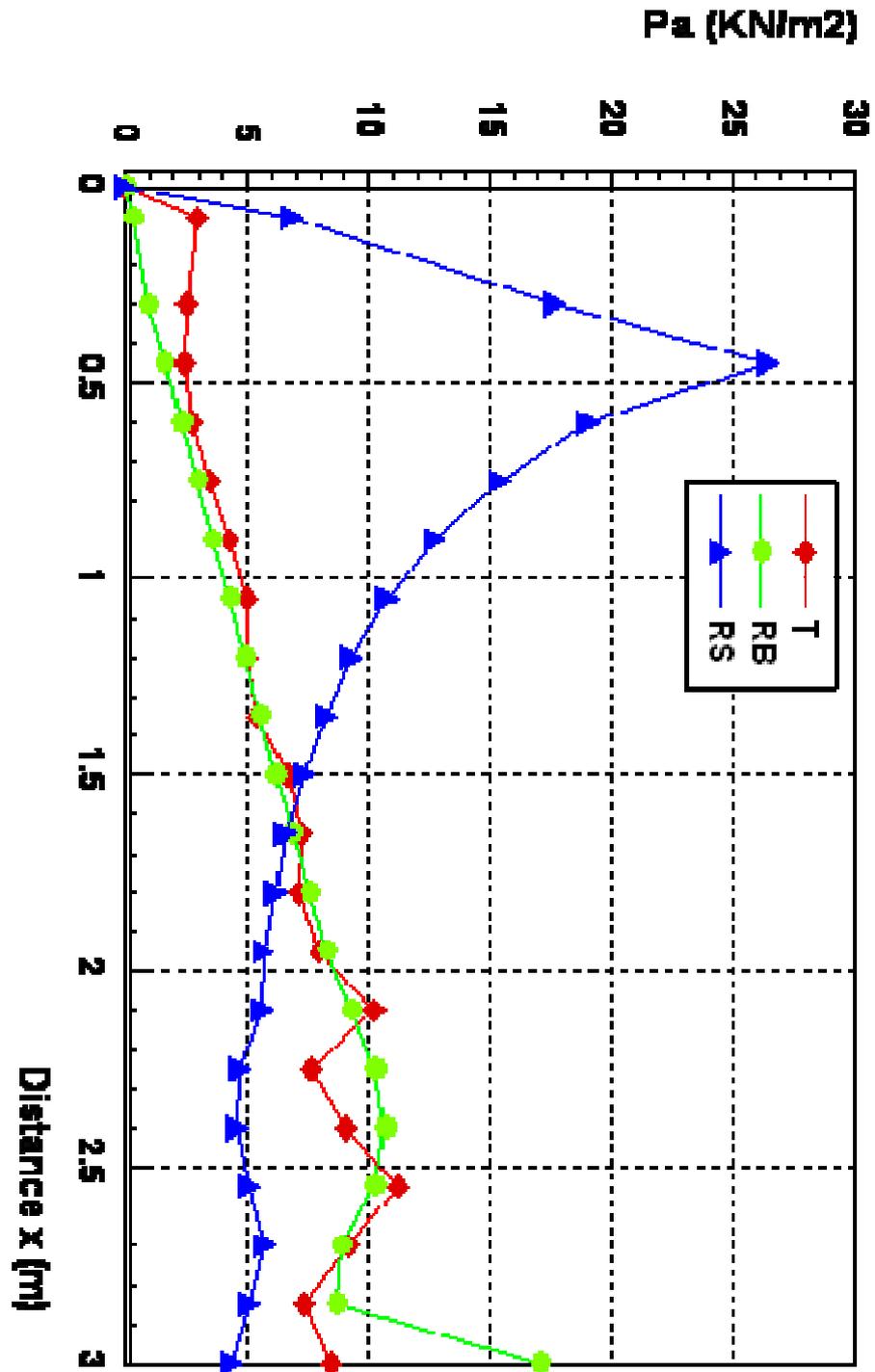


Figure 4-21b - Cas de l'écran rigide et lisse $\delta = 0$ avec $\psi = \phi = 40^\circ$

La figures 4-22, présente le changement de la distribution de pression normale active de terre le long de l'écran rigide et rugueux $\delta = \varphi = \psi = 30^\circ$ en fonction du changement du mode de mouvements (T, RB, RS).

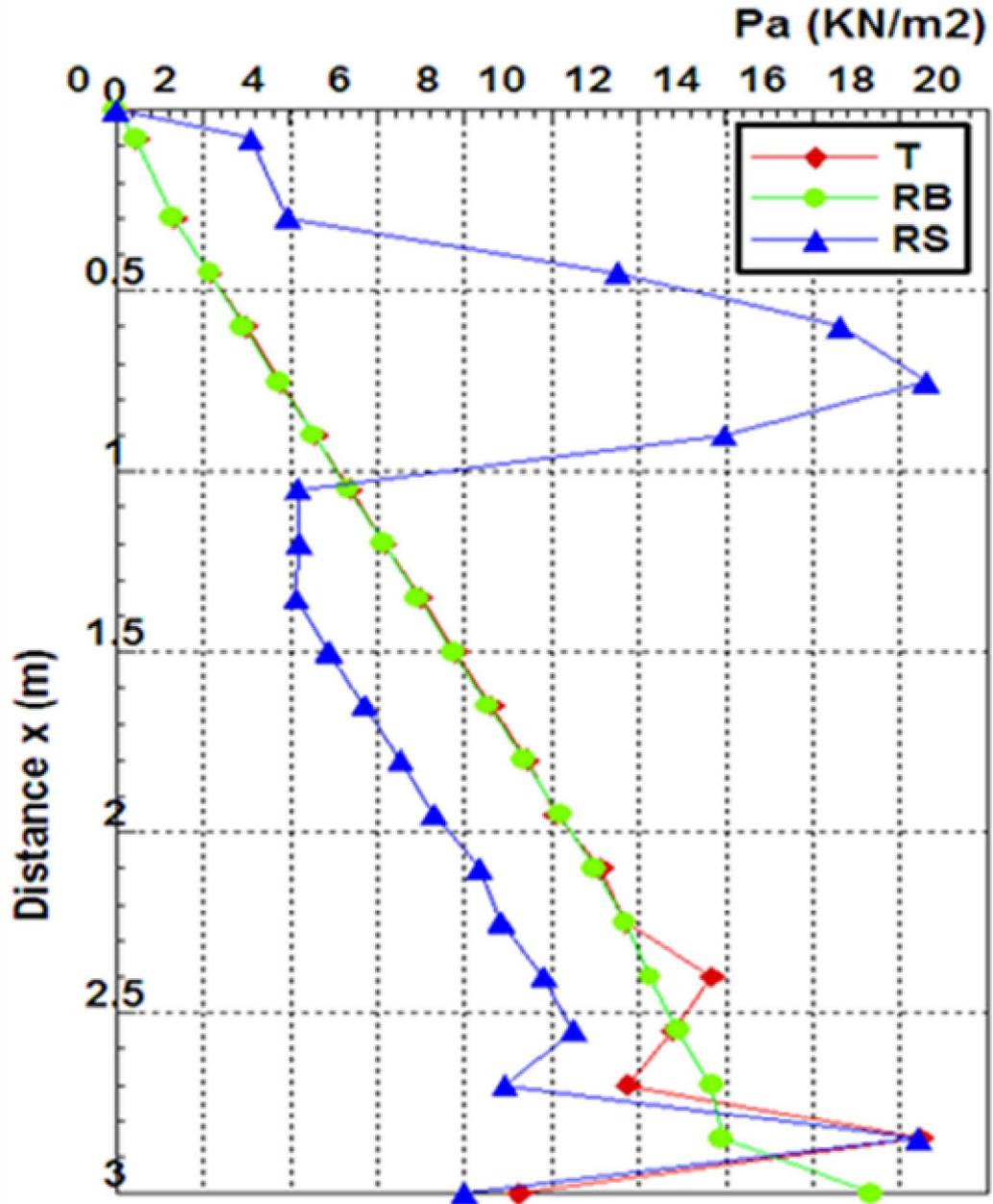


Figure 4-22- Cas de l'écran rigide et rugueux $\delta = \psi = \varphi = 30^\circ$

4-1-5-4-2 Discussions:

L'analyse comparative des résultats des diagrammes des pressions actives permet d'aboutir aux observations suivantes :

- Les diagrammes des trois modes de mouvement se croisent à moins de 50 % de la hauteur de l'écran comptée à partir du sommet.
- Au sommet de l'écran, les pressions du mode de mouvement de rotation par rapport au sommet sont importantes, par contre les pressions des modes de mouvements de translation et de rotation par rapport à la base sont presque confondues et remarquablement négligeable devant celles du mode de rotation par rapport au sommet.
- A la base, les pressions des trois modes de mouvement sont presque confondues.
- La translation et la rotation par rapport à la base ayant une même nature de la distribution de pression

4-1-4-5 Cas du coefficient de butée K_p :

L'analyse des résultats de simulation présentés dans les tableaux (4-8) à (4-14) permet d'établir les interprétations suivantes :

- On observe que l'influence du mode de mouvement de translation sur l'évaluation des coefficients de pression passive de terre a presque le même effet avec le mode de mouvement de rotation par rapport à la base soit en cas de variation de l'angle de frottement de l'interface paroi-sol δ , ou en cas de la variation de φ .
- Le mode T (translation) possède le plus grand coefficient de pression passive, ensuite vient le mode RB (rotation par rapport à la base) et RS (rotation par rapport au sommet), possède le plus faible coefficient de pression passive. avec deux exceptions.
 - 1- Lorsque $\delta = \psi = 0^\circ$ et les sols présentant un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$) on constate que les coefficients de pression de terre K_p de RS sont plus grands que k_p de RB.
 - 2- Lorsque le rapport $\delta/\varphi = 1$, $\psi = 0^\circ$ et les sols présentent un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$) on constate que les coefficients de pression de terre K_p de RB sont plus grands que k_p de T.
- La translation T et la rotation de base RB possèdent les mêmes coefficients de pression passive K_p avec une légère différence n'excédant pas 18%. Cette égalité peut être justifiée par la même nature de pression passive des deux modes. ou par le même déplacement du sommet d'écran.

4-1-5-5-1 Cas de la distribution de pression passive de la terre contre l'écran:

Les figures 4-23a et 4-23b, présentent le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ en fonction du changement du modes de mouvements (T, RB, RS) avec $\varphi = \psi = 30^\circ$ et 40° respectivement.

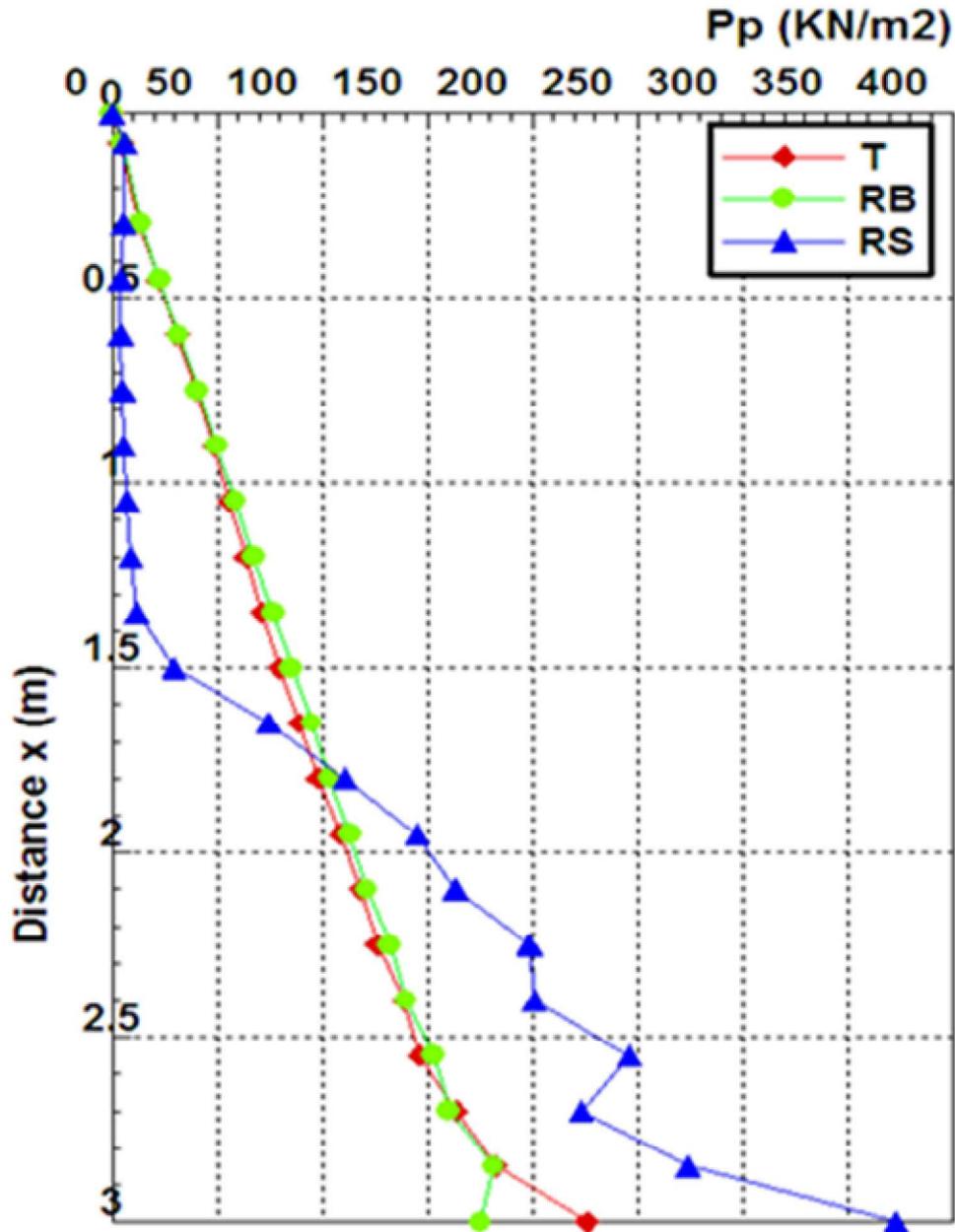


Figure 4-23a- Cas de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ et $\psi = \varphi = 30^\circ$

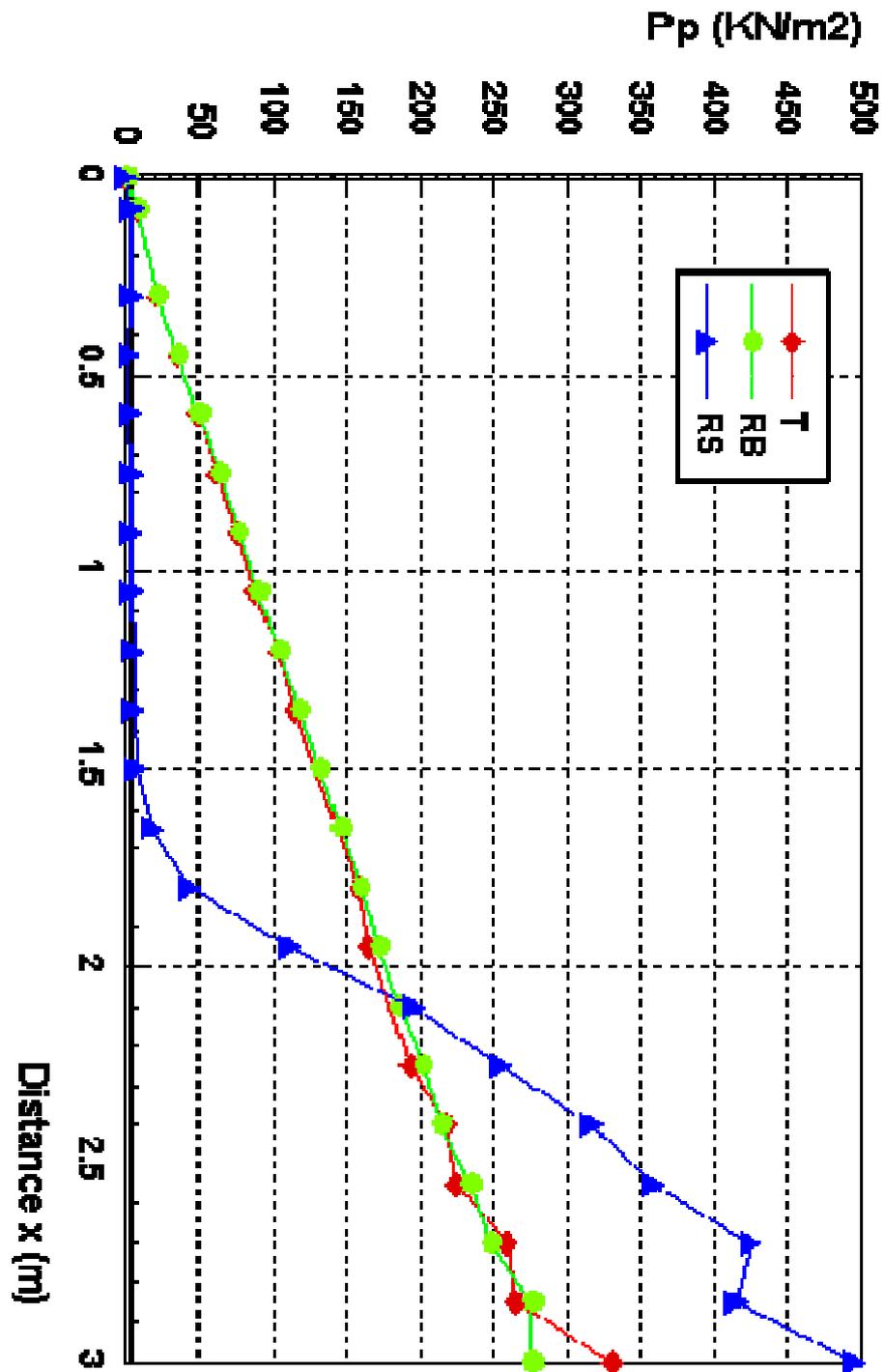


Figure 4-23b- Cas de l'écran rigide et lisse $\delta = 0^\circ$ et $\psi = \varphi = 40^\circ$

La figure 4-24, présente le changement de la distribution de pression normale passive de terre le long de l'écran rigide et rugueux $\delta = \varphi = \psi = 30^\circ$ en fonction du changement du mode de mouvements (T, RB, RS).

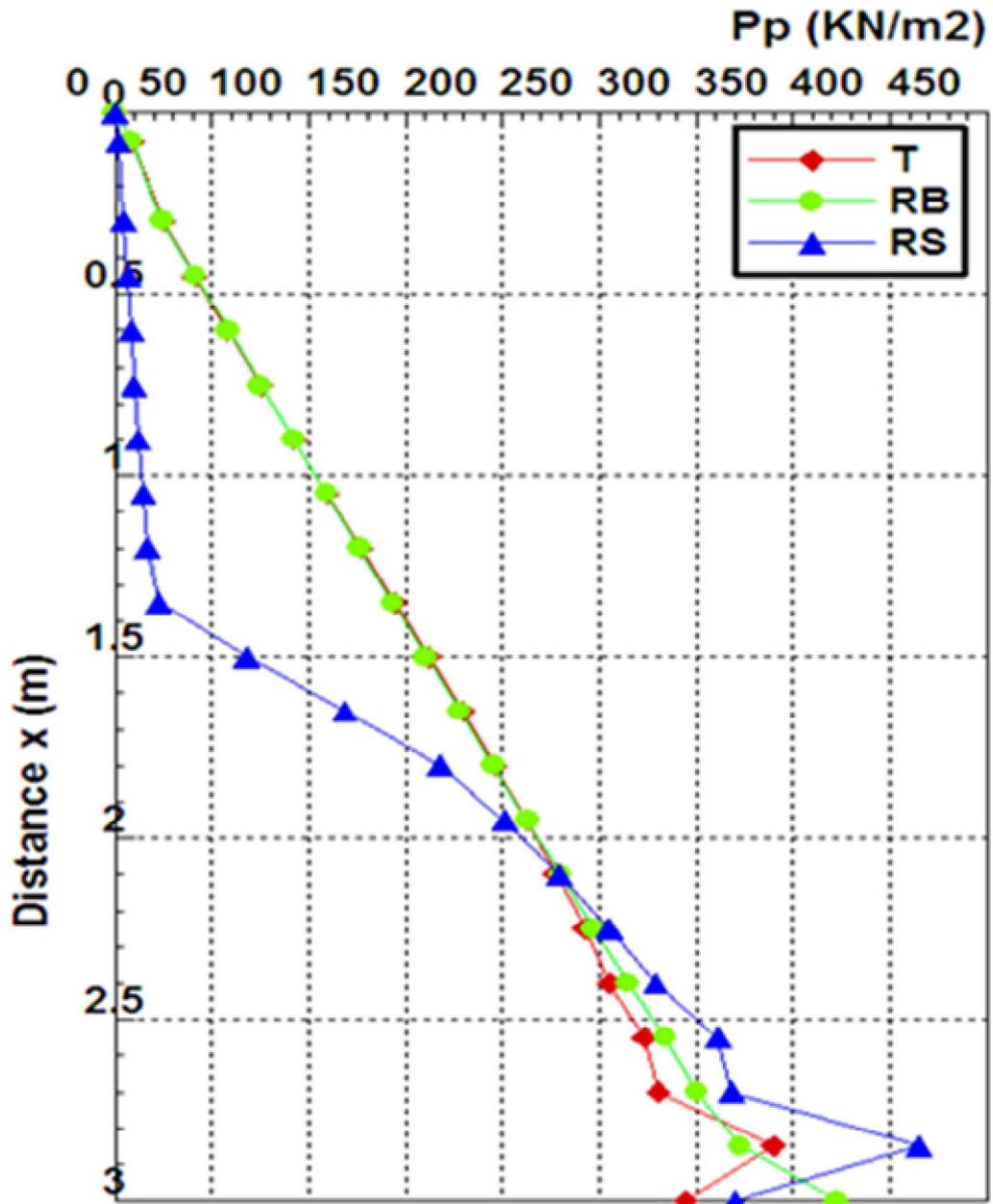


Figure 4-24a- Cas de l'écran rigide et rugueux $\delta = \psi = \varphi = 30^\circ$

4-1-4-5-2 Discussions :

L'analyse comparative des résultats des diagrammes des pressions passives permet d'établir les interprétations suivantes:

- Les diagrammes des trois modes de mouvement se croisent à plus de 50 % de la hauteur de l'écran comptée à partir du sommet.
- Au sommet de l'écran, les pressions du mode de mouvement de rotation par rapport au sommet sont très faible remarquablement négligeables devant celles des modes de mouvements de translation et de rotation par rapport à la base qui sont confondues.
- A la base, et pour un **écran parfaitement lisse $\delta = 0^\circ$** les pressions passives du mode de mouvement de rotation par rapport au sommet sont importantes, par contre les pressions des modes de mouvements de translation et de rotation par rapport à la base sont presque confondues et pour un **écran parfaitement rugueux $\delta = \varphi$** les pressions passives des trois modes sont presque confondues.
- La translation et la rotation par rapport à la base ayant une même nature de la distribution de pression

CONCLUSION GENIRALE

Cas d'écran rigide:

L'analyse des présents résultats numériques de la pression passive de terre permettent les conclusions suivantes:

La solution obtenues numériquement (FLAC2D) en cas de translation horizontale pour :

- § Un écran lisse ($\delta = 0^\circ$ et quelque soit la valeur de φ) ou écran rugueux ($\delta \neq 0^\circ$ et $\varphi < 30^\circ$) sont en parfait accord avec les valeurs données par les tables de Caquot -Kerisel
- § Un écran rugueux ($\delta \neq 0^\circ$ et $\varphi \geq 30^\circ$) sont inférieurs aux solutions données par les tables de Caquot -Kerisel
- § Si $\varphi \leq 30^\circ$ sont en parfait accord avec les valeurs de Saubra et de Saubra-Macuh.
- § Si $\varphi > 30^\circ$ sont inférieures aux solutions données par Saubra et de Saubra-Macuh.

Les valeurs données par Coulomb s'éloignent au-delà de $\varphi = 30^\circ$.

Le coefficient de la pression passive augmente avec l'angle de l'interface.

Le coefficient de la pression passive augmente avec l'angle de frottement interne du sol.

Le coefficient de butée est :

- § Sensible à la dilatance du sol uniquement pour les sols fortement frottants $\varphi > 30^\circ$ et $\delta \geq 20^\circ$.
- § Non sensible à la dilatance du sol si $\varphi < 30^\circ$ et $\delta < 20^\circ$.

$K_p(T) > K_p(RB) > K_p(RS)$ sauf

§ Pour un écran parfaitement lisse $\delta = \psi = 0^\circ$ et les sols présentant un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$) on constate que les coefficients de pression de terre K_p de RS sont plus grands que k_p de RB.

§ Pour un écran parfaitement rugueux $\delta/\varphi = 1, \psi = 0^\circ$ et les sols présentant un fort angle de frottement ($\varphi = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$) on constate que les coefficients de pression de terre K_p de RB sont plus grands que k_p de T.

L'effet de frottement interne φ est plus significatif que les deux autres effets étudiés (effet de l'angle de frottement de l'interface δ et l'effet de l'angle de dilatance ψ) pour les trois modes de mouvement translation, rotation par rapport à la base et rotation par rapport au sommet.

Les valeurs de coefficient passif de la terre K_p obtenues numériquement (FLAC 2D) dans les modes de mouvements de T, RB, RS sont plus critiques que les valeurs de coefficient passif de la terre K_p données par Caquot-Kérisel et Coulomb-Rankine.

La distribution des pressions passive de terre le long de l'écran lisse ou rugueux est :

- Linéaire pour le mode de translation et le mode de rotation par rapport à la base.
- Non linéaire avec un état de pression au repos sur moins de 50% de la hauteur de l'écran comptée à partir du sommet pour le mode de rotation par rapport au sommet.

Les diagrammes des trois modes de mouvement se croisent à plus de 50 % de la hauteur de l'écran comptée à partir du sommet.

Au sommet de l'écran, les pressions du mode de mouvement de rotation par rapport au sommet sont très faible remarquablement négligeable

devant celles des modes de mouvements de translation et de rotation par rapport à la base qui sont presque confondues.

A la base, et pour un **écran parfaitement lisse** $\delta = 0^\circ$ les pressions passives du mode de mouvement de rotation par rapport au sommet sont importantes, par contre les pressions des modes de mouvements de translation et de rotation par rapport à la base sont presque confondues et pour un **écran parfaitement rugueux** $\delta = \varphi$ les pressions passives des trois modes sont presque confondues.

La translation et la rotation par rapport à la base ayant une même nature de la distribution de pression.

L'analyse des présents résultats numériques de la pression active de terre permet les conclusions suivantes :

Les solutions présentées numériquement sont très proches de celles données par les tables de Caquot –Kerisel et Coulomb.

Le coefficient de la pression active diminue avec l'augmentation de l'angle de l'interface qui a un effet négligeable à très faible pour $\varphi \geq 20^\circ$.

Le coefficient de la pression active diminue avec l'angle de frottement interne du sol.

Le coefficient de poussée est non sensible à la dilatance du sol.

L'effet de frottement interne φ est plus significatif que les deux autres effets étudiés (effet de l'angle de l'interface δ et l'effet de l'angle de dilatance ψ) pour les trois modes de mouvements translation, rotation par rapport à la base et rotation par rapport au sommet.

$$K_a (T) < K_a (RB) < K_a (RS)$$

Que le mode de mouvement de translation est plus critique que les deux autres modes de mouvements étudiés (RS. RB) respectivement.

Que le mode de mouvement de translation ayant même effet que le mode de mouvements de rotation par rapport à la base (RB) .

La distribution des pressions actives de terre le long de l'écran **lisse** $\delta = 0^\circ$ est :

§ Linéaire pour

- Le mode de translation
- Le mode de rotation par rapport à la base avec une augmentation brusque de la pression uniquement à la base proche du centre de rotation, si $\varphi \leq 20^\circ$.
- Le mode de rotation par rapport au sommet si $\varphi \leq 20^\circ$

§ Non linéaire pour

Le mode de rotation par rapport au sommet si $\varphi > 20^\circ$

La distribution des pressions actives de terre le long de l'écran **rugueux** $\delta \neq 0^\circ$ est non linéaire pour :

§ Le mode de translation ou de rotation par rapport à la base une augmentation brusque de la pression uniquement à la base proche du centre de rotation, avec un effet très faible de l'augmentation d'angle δ sur la pression.

§ Le mode de rotation par rapport au sommet avec une concentration des contraintes au sommet de l'écran.

Les diagrammes des trois modes de mouvement se croisent à moins de 50 % de la hauteur de l'écran comptée à partir du sommet.

Au sommet de l'écran, les pressions du mode de mouvement de rotation par rapport au sommet sont importantes, par contre les pressions des

modes de mouvements de translation et de rotation par rapport à la base sont presque confondues et remarquablement négligeables devant celles du mode de rotation par rapport au sommet.

A la base, les pressions des trois modes de mouvement sont presque confondues.

La translation et la rotation par rapport à la base ayant une même nature de la distribution de pression.

Cas d'écran flexible:

L'allure du diagramme de la répartition des pressions reste la même pour chaque mouvement et qu'au fur et à mesure que l'écran s'enfonce dans le sol le diagramme des pressions passives s'approche du diagramme d'un écran rigide et les résultats du coefficient de butée pour des déplacements importants coïncident avec ceux d'un écran rigide. On note que la valeur du coefficient passive K_p d'un écran rigide est la valeur extrême que peut avoir ce coefficient lorsque l'effet de voûte disparaîtra.