

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**CALCUL DES SOUTÈNEMENTS DE TUNNELS
AVEC LA MÉTHODE CONVERGENCE-CONFINEMENT
EN TENANT COMPTE DE L'HISTORIQUE DES DÉFORMATIONS**

**ANNIE BEAUDOIN
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
GÉNIE CIVIL
JUILLET 2000**



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-57391-5

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**CALCUL DES SOUTÈNEMENTS DE TUNNELS
AVEC LA MÉTHODE CONVERGENCE-CONFINEMENT
EN TENANT COMPTE DE L'HISTORIQUE DES DÉFORMATIONS**

Présenté par : BEAUDOIN Annie

en vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MASSICOTE Bruno, Ph. D., président

M. LADANYI Branko, Ph. D., membre

Mme LEITE Maria-Helena, Ph. D., membre et directrice de recherche

M. GILL Denis E., Ph. D., membre et codirecteur de recherche

À Martin,
l'amour de ma vie.

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement ma directrice Maria-Helena Leite pour sa patience, son dévouement, son appui et tout le temps consacré à ses étudiants. Sans elle, ce projet n'aurait jamais pu se réaliser. Merci aussi à M Denis Gill pour son dévouement, son support et sa présence, même à la retraite.

Un merci tout spécial à mes collègues de travail pour avoir enduré mes élucubrations sur des sujets très loin du train-train quotidien et à Mme Francine Blais pour le temps qu'elle m'a consacré à faire la saisie et la correction de ce document.

Je tiens aussi à souligner le support de ma famille et de mes amis, sans qui ces trois années auraient été comme une traversée du désert. Merci aussi à mon conjoint, sans qui ma vie n'aurait pas sa saveur (et sans qui, ce texte serait incroyablement truffé de fautes).

Résumé

Le but de cette étude est de monter les limites de l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle lors du dimensionnement du soutènement avec un massif ayant un comportement différé.

Le modèle analysé dans ce projet répond aux hypothèses suivantes : le tunnel est cylindrique circulaire, l'état de contrainte préalable dans le massif rocheux est isotrope, le soutènement est un revêtement monolithique de béton dont la courbe de réaction s'obtient par analogie avec les cylindres à parois épaisses dont le comportement est élastique linéaire et le front de taille n'a aucune influence.

Il existe plusieurs lois de comportement définissant le fluage dans les massifs rocheux. Nous avons travaillé avec les lois de comportement suivantes : Maxwell, Zener et loi de puissance (ou Maxwell non-linéaire).

Pour les trois lois de comportement, nous avons calculé l'historique de chargement du soutènement par les approches analytiques, numériques et graphiques. Nous avons fait varier la rigidité du soutènement et les paramètres de fluage. Pour l'approche graphique convergence-confinement modifiée, nous avons aussi étudié l'influence d'une seconde itération et du nombre de pas.

L'analyse des résultats est faite en deux temps : comparaison entre les approches numériques et graphiques avec l'approche analytique pour les lois de comportement de Maxwell et Zener, et, pour la loi de puissance, comparaison entre les approches graphiques convergence-confinement conventionnelle et modifiée ainsi que numérique.

L'étude de la rigidité du soutènement nous a permis de constater que ce paramètre a une influence très importante sur toutes les approches.

L'étude des paramètres de fluage est plus complexe à analyser car elle dépend de la loi de comportement étudiée et les tendances fluctuent en fonction des approches de calcul employées.

Pour l'approche graphique convergence-confinement modifiée, l'étude du nombre de pas nous a clairement démontré que 10 pas d'incrément de charge donnent des résultats suffisamment proches de ceux obtenus en augmentant le nombre de pas jusqu'à 100 pour que cet effort de calcul supplémentaire en vaille la peine. L'étude du nombre d'itérations nous a révélé que la seconde itération n'était pas nécessaire pour les lois de comportement de Maxwell et Zener. Cependant, la seconde itération améliore de façon significative les résultats pour la loi de comportement loi de puissance. Cependant, étant donné le temps nécessaire pour réaliser une seconde et même une troisième itération et compte tenu de l'amélioration obtenue, nous n'avons effectué qu'une seule itération pour toutes les lois de comportement.

Toutes études confondues, nous avons remarqué que certaines approches donnent de meilleurs résultats que d'autres. Dans l'ordre décroissant, le classement est : l'approche analytique, l'approche numérique, l'approche graphique convergence-confinement modifiée, et finalement, l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle.

En conclusion, l'approche la plus simple et la plus rapide pour faire le design du soutènement, en ayant une bonne estimation de l'historique de chargement du soutènement, lors qu'il est impossible d'utiliser l'approche

analytique, est l'approche graphique convergence-confinement modifiée. Elle permet un bon compromis entre la facilité d'obtention des résultats et la précision de ceux-ci.

Abstract

The objective of this study is to show the limits of the conventional convergence-confinement method for the design of tunnel linings in creeping rock masses.

The model of the present study relies on the following hypotheses : the underground opening is a circular cylindrical tunnel and the considered section is far enough from the face so that plane strain conditions are valid, the predriving ground state of stress is hydrostatic, the rock mass is homogeneous and isotropic, the ground support system consists of a concrete lining which is assumed to be linearly elastic, the lining is installed at any time after the driving of the tunnel and failure of the rock mass is prevented.

There are many constitutive laws for describing the creep behavior of rocks. Among them, the following three have been selected for the present study: Maxwell, Zener and a power law (or non-linear Maxwell).

For these three laws, ground pressure histories on the lining are calculated by numerical analyses, by closed-form solutions (when possible) and by the conventional and the modified convergence-confinement method. A parametric study has been performed to take into account the influence of the lining stiffness and of the creep laws and associated parameters on the pressure on the lining. For the modified convergence-confinement method, the influence of the number of steps and of a second iteration has also been investigated.

The analyses of the results was done in two parts : comparison between numerical analyses and graphical methods to closed-form solutions for Maxwell and Zener, and, for power law, comparison between graphical methods and numerical analyses.

The study of the lining stiffness influence permits to observe the great influence of this parameter on all the methods.

The influence of the creep parameters is complex to analyze and depend a lot on the creep law studied and the method used.

For the modified convergence-confinement method the study showed that 10 loading steps give results so close to those obtained by 100 loading steps that it isn't worth the trouble of using so many steps. The study of the number of iterations reveals that a second iteration is not necessary for the creep law of Maxwell and Zener. However, a second iteration improves the results obtained for the power law. Considerably, the time needed to get the results of a second and even a third iteration and with the improvements obtained, we decided to limit the calculation to one iteration for all the creep laws.

The results showed that a certain method gives better results than others. In decreased order, the classification is : by closed-form solutions (when possible), numerical analyses, the modified convergence-confinement method, and finally, the conventional convergence-confinement method.

In conclusion, the method the simplest and the fastest to make a lining design, with a good estimation of the ground pressure histories, when it is impossible to use a closed-form solution, is the modified convergence-confinement method. It gives a good compromise between easiness of getting results and their precision.

Table des matières

DÉDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS.....	v
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	xiv
LISTE DES TABLEAUX.....	xxii
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....	xxvii
LISTE DES ANNEXES.....	xxix
CHAPITRE 1: INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2: LE DIMENSIONNEMENT DU SOUTÈNEMENT AVEC DES MASSIFS ROCHEUX AYANT UN COMPORTEMENT DIFFÉRÉ.....	7
2.1 Le comportement du massif.....	7
2.1.1 Loi de fluage secondaire.....	10
2.1.2 Loi de fluage primaire.....	11
2.2 Le comportement du soutènement.....	13
2.3 Modèles de calcul de pression sur le soutènement.....	15
2.3.1 Approche empirique.....	15
2.3.2 Approche analytique.....	16
2.3.3 Approche numérique.....	20
2.3.4 Approche graphique.....	22
CHAPITRE 3: MÉTHODOLOGIE.....	31
3.1 Validation des modèles numériques.....	31
3.2 Choix de la procédure pour l'application de la méthode convergence-confinement modifiée.....	34
3.3 Choix des cas étudiés.....	34
3.4 Analyse des résultats.....	36

CHAPITRE 4: PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	37
4.1 Validation des modèles numériques.....	37
4.2 Choix de la procédure.....	41
4.2.1 Obtention des lignes caractéristiques du massif.....	41
4.2.2 Influence du nombre de pas.....	41
4.2.3 Influence du nombre d'itération.....	47
4.2.4 Procédure adoptée.....	57
4.3 Cas étudiés.....	57
4.3.1 Loi de comportement de Maxwell linéaire.....	57
4.3.1.1 Influence de la rigidité du soutènement.....	57
4.3.1.2 Influence des paramètres de fluage...	59
4.3.1.3 Comparaison entre les approches numérique et analytique.....	62
4.3.2 Loi de comportement de Zener.....	64
4.3.2.1 Influence de la rigidité du soutènement.....	64
4.3.2.2 Influence des paramètres de fluage...	66
4.3.2.3 Comparaison entre les approches numérique et analytique.....	68
4.3.3 Loi de comportement loi de puissance.....	70
4.3.3.1 Influence de la rigidité du soutènement.....	70
4.3.3.2 Influence des paramètres de fluage	71
4.3.3.3 Comparaison entre les approches graphiques et numérique.....	73
CHAPITRE 5: ANALYSE DES RÉSULTATS.....	76

5.1	Validation des modèles numériques.....	76
5.1.1	Mise en situation.....	76
5.1.2	Lois de Maxwell linéaire et Zener.....	76
5.1.3	Loi de puissance.....	78
5.2	Méthode convergence-confinement.....	79
5.2.1	Influence du nombre de pas et du nombre d'itérations pour la méthode convergence- confinement modifiée.....	79
5.2.1.1	Lois de Maxwell linéaire et Zener....	79
5.2.1.2	Loi de puissance.....	80
5.2.2	Méthode convergence-confinement modifiée.	81
5.2.2.1	Lois de Maxwell linéaire et Zener...	81
5.2.2.1.1	Influence de la rigidité du soutènement.....	81
5.2.2.1.2	Influence des paramètres de fluage.....	81
5.2.2.2	Loi de puissance.....	82
5.2.2.2.1	Influence de la rigidité du soutènement.....	82
5.2.2.2.2	Influence des paramètres de fluage.....	82
5.2.3	Méthode convergence-confinement conventionnelle.....	83
5.2.3.1	Lois de Maxwell linéaire et Zener...	83
5.2.3.1.1	Influence de la rigidité du soutènement.....	83
5.2.3.1.2	Influence des paramètres de fluage.....	84

5.2.3.2	Loi de puissance.....	84
5.2.4	Comparaison entre les approches.....	85
5.2.4.1	Lois de Maxwell linéaire et Zener...	85
5.2.4.2	Loi de puissance.....	85
CHAPITRE 6:	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	87
RÉFÉRENCES		90

Liste des figures

Figure 1.1	Influence de la position du front de taille sur la convergence à court terme sur une section donnée (tirée des notes de cours de Gill, D. E., 1983).....	5
Figure 1.2	Diagramme d'interaction.....	5
Figure 1.3	Étude de la convergence d'une section en fonction du diagramme d'avancement du front de taille (tirée de Panet 1995).....	6
Figure 2.1	Courbe de fluage typique.....	9
Figure 2.2	Modèle rhéologique de loi de comportement de Maxwell.....	10
Figure 2.3	Modèle rhéologique de loi de comportement de Zener.....	11
Figure 2.4	Modèle rhéologique de loi de comportement loi de puissance.....	12
Figure 2.5	Cylindre à paroi épaisse sous pression.....	14
Figure 2.6	Schéma de calcul de Flac.....	21
Figure 2.7	Diagramme d'interaction montrant des lignes caractéristiques isochrones (tirée de Ladanyi (1974)).....	26
Figure 2.8	Historique de chargement postulé avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparativement à l'historique obtenu avec l'approche analytique.....	27
Figure 2.9	Historiques de chargement du soutènement calculés d'après les différentes approches (tiré de Gill et Ladanyi (1983)).....	28
Figure 2.10	Historique de chargement du soutènement postulé avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée lors de la première itération.....	29
Figure 2.11	Diagramme d'interaction pour la loi de comportement de Maxwell (tiré de Gill et Ladanyi (1983)).....	30
Figure 3.1	Modèle axisymétrique.....	32
Figure 3.2	Modèle en déformation plane ou quart de modèle.....	33

Figure 4.1	Pression au contact soutènement massif - Validation du modèle de la loi de comportement de Maxwell pour l'approche numérique par le graphique d'historique de chargement avec les valeurs de l'approche analytique, pour les données de l'article de Gill et Ladanyi (1983).....	39
Figure 4.2	Pression au contact soutènement massif - Validation du modèle de la loi de comportement de Zener pour l'approche numérique par le graphique d'historique de chargement avec les valeurs de l'approche analytique, pour les données de l'article de Gill et Ladanyi (1987).....	39
Figure 4.3	Pression au contact soutènement massif - Validation du modèle de la loi de comportement loi de puissance pour l'approche numérique par le graphique d'historique de chargement avec les valeurs de l'approche analytique, pour les données de l'article de Ladanyi et Gill (1984).....	40
Figure 4.4	Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la première itération...	43
Figure 4.5	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence du nombre d'incrément de charge lors de la première itération.....	43
Figure 4.6	Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la première itération...	44

Figure 4.7	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence du nombre d'incréments de charge lors de la première itération.....	44
Figure 4.8	Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la première itération.....	45
Figure 4.9	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence du nombre d'incréments de charge lors de la première itération.....	45
Figure 4.10	Description de la méthode de détermination de la fonction d'intervalles de temps pour les incréments de charge lors d'une seconde ou d'une troisième itération.....	48
Figure 4.11	Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la seconde itération.....	50
Figure 4.12	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence du nombre d'incréments de charge lors de la seconde itération.....	50
Figure 4.13	Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la seconde itération....	51

Figure 4.14	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence du nombre d'incréments de charge lors de la seconde itération.....	51
Figure 4.15	Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la seconde itération	52
Figure 4.16	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence du nombre d'incréments de charge lors de la seconde itération.....	52
Figure 4.17	Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la troisième itération.....	53
Figure 4.18	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence du nombre d'incréments de charge lors de la troisième itération.....	53
Figure 4.19	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement Maxwell avec les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique pour faire la comparaison entre la première et la seconde itération.....	55

Figure 4.20	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement Zener avec les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique pour faire la comparaison entre la première et la seconde itération.....	56
Figure 4.21	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique pour faire la comparaison entre la première, seconde et troisième itération.....	56
Figure 4.22	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement	58
Figure 4.23	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement.....	59
Figure 4.24	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage.....	60
Figure 4.25	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage.....	61

Figure 4.26	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches numérique et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement.....	62
Figure 4.27	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches numérique et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage.....	63
Figure 4.28	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement.....	64
Figure 4.29	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage.....	65
Figure 4.30	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage.....	66
Figure 4.31	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage.....	67
Figure 4.32	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches numérique et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement.....	68

Figure 4.33	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches numérique et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage...	69
Figure 4.34	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement.....	70
Figure 4.35	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence de n , un des paramètres de fluage.....	71
Figure 4.36	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence de w , un des paramètres de fluage.....	72
Figure 4.37	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle, modifiée et numérique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement.....	73
Figure 4.38	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle, modifiée et numérique illustrant l'influence de n , un des paramètres de fluage.....	74

Figure 4.39	Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle, modifiée et numérique illustrant l'influence de w , un des paramètres de fluage.....	74
-------------	---	----

Liste des tableaux

Tableau 3.1	Données des cas de référence utilisés pour la validation des modèles numériques.....	33
Tableau 3.2	Synthèse des différents paramètres utilisés avec la loi de comportement de Maxwell.....	34
Tableau 3.3	Synthèse des différents paramètres utilisés avec la loi de comportement de Zener.....	35
Tableau 3.4	Synthèse des différents paramètres utilisés avec la loi de comportement loi de puissance.....	35
Tableau 4.1	Paramètres pour les intervalles de temps dans Flac.....	38
Tableau 4.2	Nombre d'incréments étudiés avec chacun des modèles de fluage.....	41
Tableau 4.3	Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence du nombre de pas lors de la première itération.....	46
Tableau 4.4	Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence du nombre de pas lors de la première itération.....	46
Tableau 4.5	Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence du nombre de pas lors de la première itération.....	47
Tableau 4.6	Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence du nombre de pas lors de la seconde itération.....	54

Tableau 4.7	Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence du nombre de pas lors de la seconde itération.....	54
Tableau 4.8	Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence du nombre de pas lors de la seconde itération.....	54
Tableau 4.9	Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence du nombre de pas lors de la troisième itération.....	55
Tableau 4.10	Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement.....	58
Tableau 4.11	Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement.....	59
Tableau 4.12	Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage.....	60
Tableau 4.13	Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage.....	61

Tableau 4.14	Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche numérique comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement.....	62
Tableau 4.15	Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche numérique comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage.....	63
Tableau 4.16	Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement.....	64
Tableau 4.17	Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement.....	65
Tableau 4.18	Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage.....	66
Tableau 4.19	Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage.....	67
Tableau 4.20	Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche numérique comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement.....	68
Tableau 4.21	Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche numérique comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage.....	69

Tableau 4.22	Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence de la rigidité du soutènement.....	70
Tableau 4.23	Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence de n , un des paramètres de fluage.....	71
Tableau 4.24	Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence de w , un des paramètres de fluage.....	72

Liste des symboles et abréviations

a	rayon interne du soutènement
b	rayon externe du soutènement
c	convergence
D	inverse de la rigidité du soutènement
d	diamètre de l'excavation
E'	module de Young du béton du soutènement
E_1, η_1	paramètres du modèle de Maxwell
e_{ij}	composantes du tenseur des déviateurs de déformation
$e_{ij}(t)$	composantes du tenseur des déviateurs de déformation en fonction du temps
ε	déformations
ε^c	déformations de fluage
ε^c	taux de fluage de référence par rapport auquel la contrainte σ_c est définie
ε^c_c	déformation de fluage équivalente de von Mises
ε^c_c	taux de déformation de fluage équivalente de von Mises
ε^e	déformations élastiques
ε_{ij}	composantes du tenseur des déformations
ε_m	déformation moyenne
ε^t	déformations totales
G	module de cisaillement
h	nombre de pas
K	module de compressibilité hydrostatique
K_b	rigidité du soutènement
k_1, k_2, η_2	paramètres du modèle de Zener

l	temps d'installation du soutènement
ν'	coefficient de Poisson du béton du soutènement
$P(t)$	pression à l'interface massif-soutènement en fonction du temps
p_{ext}	pression externe
p_i	pression donnée
p_{icr}	pression critique
p_{int}	pression interne
p_o	pression initiale
r	distance radiale
S_{ij}	composantes du tenseur des déviateurs de contraintes
σ	contrainte
σ_e	contrainte équivalente de von Mises
σ_{ij}	composantes du tenseur de contraintes
σ_m	contrainte moyenne
σ_r	contrainte radiale
σ_θ	contrainte tangentielle
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	contraintes principales
T	température
t	temps
t_R	temps de relaxation
τ	temps transformé
$U(t)$	déplacement radial de la paroi en fonction du temps
$U(\tau)$	déplacement radial de la paroi en fonction du temps transformé
u	déplacement radial
w, n, λ	constantes de fluage de la loi de puissance
x	avancement du front de taille

Liste des annexes

Annexe I	Structure des fichiers pour l'approche numérique.....	95
Annexe II	Structure des fichiers pour l'approche graphique convergence-confinement modifiée.....	104
Annexe III	Influence du nombre de pas.....	115

Chapitre 1

Introduction

Autant dans l'industrie minière que pour les ouvrages de génie civil, il est fréquent de procéder à l'excavation de tunnels. Le percement dans la roche amène une modification des contraintes en place. Pour trouver un nouvel équilibre, les parois se déplacent. Ce mouvement est appelé convergence. Les déplacements peuvent se faire immédiatement après le percement ou se poursuivre sur de longues périodes.

De tels mouvements peuvent poser de sérieux problèmes. Effectivement, si les déplacements de la paroi sont trop importants, l'excavation peut ne plus être fonctionnelle ou pire encore, il y a effondrement. Alors, pour reprendre les pressions des terres et limiter les déplacements, il faut installer un soutènement. Ainsi le confinement du tunnel est assuré.

Les déplacements de la paroi créent une pression sur le revêtement. La mise en charge de celui-ci peut se faire de trois façons : par la réaction du massif rocheux à court terme (figure 1.1), à long terme ou par une combinaison des deux phénomènes (figure 1.3).

La conception du soutènement est un élément important du design d'un tunnel. Un surdimensionnement du revêtement est certes sécuritaire, mais peut entraîner des coûts inutiles. Par contre, un soutènement trop faible ne remplit pas ses fonctions et l'excavation peut devenir inutilisable.

Il y a plusieurs méthodes pour faire le design de tunnels soutenus. Il y a des méthodes empiriques, basées sur l'expérience. Il s'agit habituellement de méthodes simples et faciles à utiliser. Malheureusement, leurs applications sont limitées à des cas similaires à ceux qui ont servi de base à la méthode. Il existe des méthodes analytiques. Elles ont l'avantage de fournir des solutions complètes et exactes. Cependant, les hypothèses de base peuvent être tellement simplificatrices qu'elles représentent moins fidèlement la réalité. De plus, les paramètres à utiliser sont parfois difficiles à obtenir. Il y a aussi des méthodes numériques qui donnent des solutions rapidement. Malheureusement, les logiciels sont souvent coûteux et difficiles à utiliser. Finalement, il y a une méthode à mi-chemin entre les deux précédentes : la méthode convergence-confinement.

Il s'agit d'une méthode entièrement graphique. Elle tire profit d'un diagramme appelé diagramme d'interaction, illustré à la figure 1.2. L'ordonnée de ce graphique représente la pression à l'interface massif-soutènement alors que l'abscisse représente la convergence des parois et celle de l'extrados du soutènement. Ce diagramme est composé d'une ou de plusieurs courbes appelées lignes caractéristiques du massif rocheux et de la courbe de réaction du massif. Les coordonnées du point de rencontre de la courbe de réaction du soutènement et d'une ligne caractéristique représentent la pression exercée sur le soutènement et le déplacement de l'extrados de ce dernier pour les conditions de cette ligne caractéristique. Ce sont les paramètres de design et de suivi de l'ouvrage les plus importants.

Puisque toute cette solution repose sur le tracé des courbes, il faut y apporter un soin particulier. La courbe de réaction du soutènement est dépendante des matériaux de construction utilisés et du type de revêtement choisi. Pour le soutènement, plusieurs auteurs se sont penchés sur la question et il existe des équations qui

permettent de dessiner les courbes de réaction (Hoek et Brown, 1980). Pour notre étude, nous utiliserons un revêtement monolithique de béton dont la courbe de réaction s'obtient par analogie avec les cylindres à parois épaisses dont le comportement est élastique linéaire.

Pour la courbe caractéristique du massif, les facteurs d'influence sont nombreux : la forme du tunnel, la vitesse d'avancement du tunnel, la distance du front de taille, la loi de comportement du massif, l'état de contraintes préalables au percement, l'historique de poussée du soutènement,...

La forme du tunnel joue un rôle important dans la convergence des parois. Par exemple, les parois d'un tunnel cylindrique circulaire ne se déplaceront pas de la même façon que celles d'une excavation cylindrique elliptique. Pour simplifier l'étude de la méthode convergence-confinement, la majorité des auteurs utilisent un tunnel cylindrique circulaire. Nous nous en tiendrons donc à l'étude de ce cas particulier qui demeure, néanmoins, courant dans la pratique.

La vitesse d'avancement du tunnel a aussi un impact important sur le mouvement des parois. Des déplacements dans le massif rocheux se produisent avant même que le front de taille ne soit parvenu à la section qui nous intéresse, comme le montre la figure 1.1. La convergence d'une section croît très rapidement lorsque le front de taille s'éloigne. Cependant, lorsque le front de taille est à une distance d'environ une fois et demie le diamètre du tunnel, avant ou après être passé dans une section déterminée, celui-ci n'a plus d'influence sur la convergence des parois.

Nous observons sur le graphique (c) de la figure 1.3 que la convergence peut aussi se poursuivre lorsque l'avancement du tunnel est interrompu. Il s'agit d'une illustration du comportement différé du massif. Lorsque le front de taille est hors de

la zone d'influence (environ une fois et demie le diamètre de l'excavation), seuls les phénomènes de comportement différé sont impliqués.

La méthode convergence-confinement conventionnelle ne considère pas l'historique de poussée du soutènement sur les parois de l'excavation. Gill et Ladanyi (1983) ont clairement démontré l'influence de ce paramètre dans le tracé des courbes caractéristiques du massif. Cependant, pour obtenir des lignes caractéristiques qui tiennent compte des effets de l'historique des déformations, il faut connaître l'historique de poussée du massif rocheux sur le soutènement. Or, cet historique est inconnu au moment où l'on désire obtenir les lignes caractéristiques.

Gill et Ladanyi (1983) ont proposé une méthode itérative pour résoudre cette difficulté. Ils l'ont appliquée dans le cas de lois de comportement de type Maxwell linéaire, de loi de puissance (Maxwell non-linéaire)(Ladanyi et Gill, 1984) et de Zener (Gill et Ladanyi, 1987).

L'objectif de ce travail est de montrer les limites de la méthode convergence-confinement conventionnelle. Pour ce faire, nous avons fait une étude paramétrique portant sur l'influence des paramètres de fluage et de la rigidité du soutènement. Les répercussions pouvant être différentes selon la loi de fluage utilisée, nous avons étudié les modèles suivants: Maxwell, Zener et loi de puissance (Maxwell non-linéaire). Pour chacun des modèles traités, les résultats de la méthode convergence-confinement conventionnelle ont été comparés à ceux obtenus par des équations analytiques lors que disponibles, par des simulations numériques et par la méthode convergence-confinement modifiée. Ainsi, nous pouvons mettre en relief, d'une part, les faiblesses de la méthode convergence-confinement conventionnelle et d'autre part les avantages de la méthode convergence-confinement modifiée.

Dans les pages qui suivent, le lecteur trouvera un survol de la théorie des différents modèles de fluage et une revue de littérature portant sur la méthode convergence-confinement. Par la suite, nous présentons la méthodologie employée, les multiples résultats obtenus et l'analyse de ceux-ci. Pour terminer, nous concluons et ferons quelques recommandations.

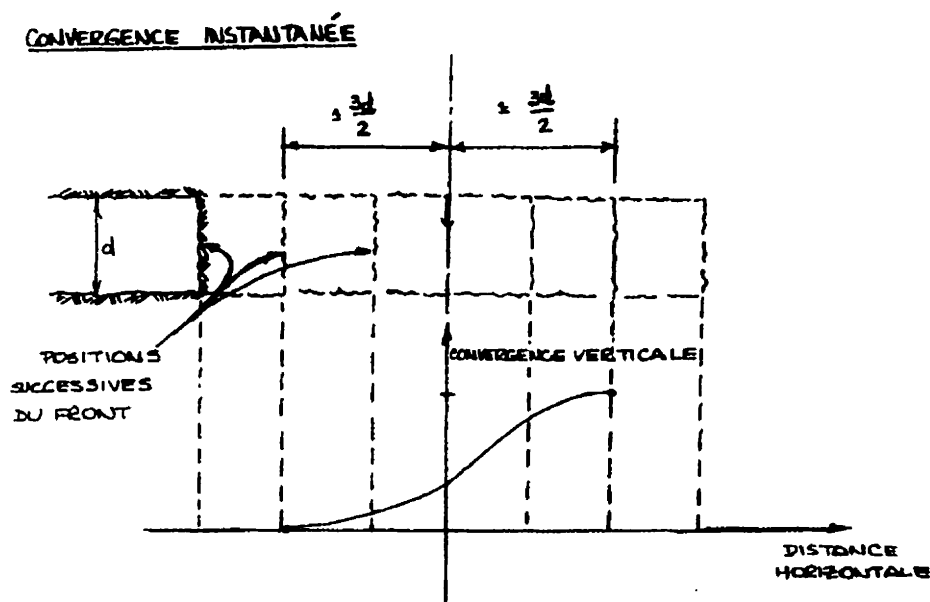


Figure 1.1 Influence de la position du front de taille sur la convergence à court terme sur une section donnée (tirée des notes de cours de Gill, D.E., 1983)

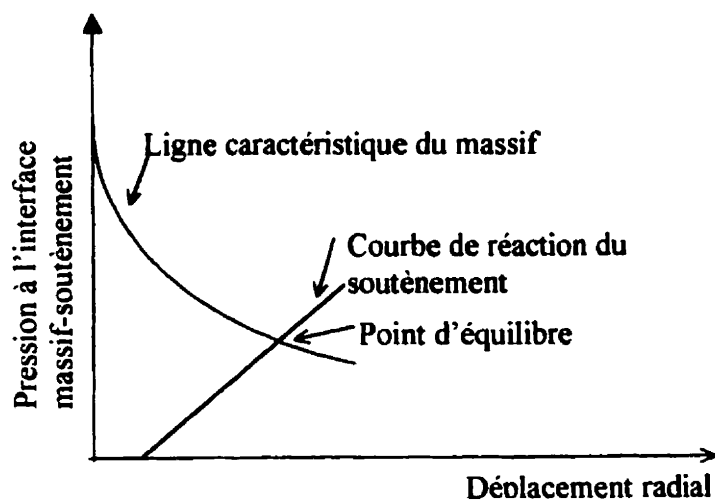


Figure 1.2 Diagramme d'interaction

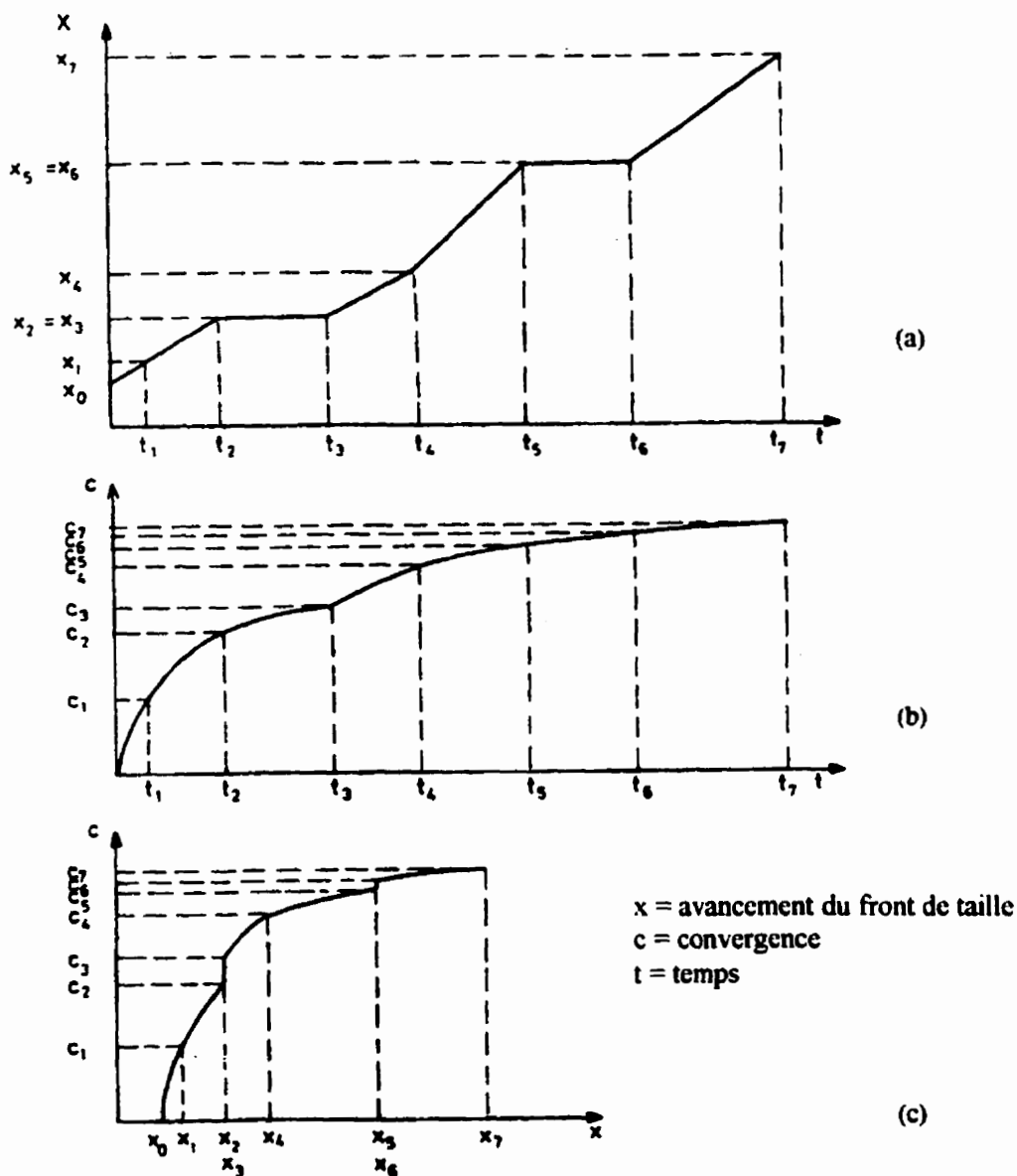


Figure 1.3 Etude de la convergence d'une section en fonction du diagramme d'avancement du front de taille (tiré de Panet 1995). (a) : avancement du front de taille contre le temps ; (b) : convergence mesurée en une section donnée du souterrain en fonction du temps ; (c) : convergence mesurée à la même section du souterrain contre l'avancement du front de taille. Le graphique (c) s'obtient en combinant les graphiques (a) et (b).

Chapitre 2

Le dimensionnement du soutènement avec des massifs rocheux ayant un comportement différé

2.1 Le comportement du massif

Les déformations de la paroi d'une excavation peuvent s'exprimer comme suit :

$$\varepsilon^l = \varepsilon^e + \varepsilon^c \quad (1)$$

où ε^l = déformations totales

ε^e = déformations élastiques

ε^c = déformations de fluage

Les déformations élastiques surviennent instantanément ; les déformations dues au fluage surviennent sur de longues périodes. Les déplacements de la paroi amènent un chargement du soutènement. Il existe des massifs qui présentent des déformations différées négligeables à l'intérieur d'une période de temps couvrant la durée de vie de l'ouvrage. Alors, le chargement n'est imputable qu'à la réaction élastique du massif. D'autres massifs ont un comportement différé. Donc, le soutènement peut être mis en charge par la réaction élastique et poursuivre le chargement à cause du fluage. Finalement pour des situations où la réaction élastique est complètement dissipée avant l'installation du soutènement, celui-ci ne peut être chargé que par la réaction différée du massif. Nous allons étudier uniquement les situations où le chargement du soutènement est dû au fluage.

D'une façon générale, l'état de contrainte dans un massif peut s'exprimer comme suit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

où σ_{ij} = composantes du tenseur des contraintes

σ_m = contrainte moyenne définie de la façon suivante

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (3)$$

S_{ij} = composantes du tenseur des déviateurs de contraintes

définies par $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}$ (4)

avec $i, j = 1, 2, 3$

$\delta_{ij} = 1$ si $i=j$

$\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$

L'état de déformations correspondant d'écrit :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_m & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_m & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

où ε_{ij} = composantes du tenseur des déformations

ε_m = déformation moyenne définie de la façon suivante

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3} \quad (6)$$

e_{ij} = composantes du tenseur des déviateurs de déformation

définies par $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_m \delta_{ij}$ (7)

avec $i, j = 1, 2, 3$

$\delta_{ij} = 1$ si $i=j$

$\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$

Les relations entre les contraintes et les déformations en un point d'un massif élastique linéaire sont :

$$\sigma_m = 3K\varepsilon_m$$

où K = module de compressibilité hydrostatique

$$S_{ij} = 2Ge_{ij}$$

où G = module de cisaillement

(8)

(9)

Dans le cas des massifs présentant un fluage, la relation $\sigma_m \times \varepsilon_m$ est considérée élastique linéaire. Pour ce qui est de la relation $S_{ij} \times e_{ij}$, elle peut être exprimée, de façon générale par :

$$f(S_{ij}, e_{ij}^c, t, T) = 0$$

où t = temps

T = température

(10)

Pour l'étude du fluage en massif rocheux, nous allons simplement considérer que la température est constante. Elle n'influencera donc pas le comportement du roc.

Le graphique de la figure 2.1 montre une courbe typique de fluage à une température constante et pour une contrainte uniaxiale maintenue déterminée :

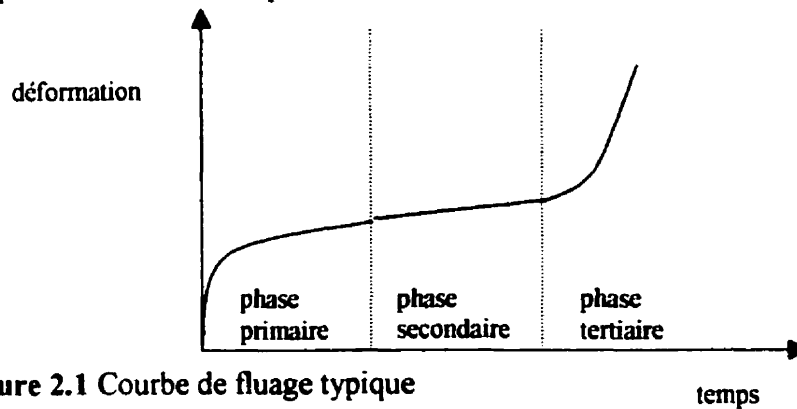


Figure 2.1 Courbe de fluage typique

Les trois régimes dans le processus de fluage, qui sont identifiés à la figure 2.1, sont : le fluage primaire, le fluage secondaire ou à taux constant et le fluage tertiaire. Lors du fluage primaire, le taux de fluage diminue et dans le fluage secondaire le taux demeure à peu près constant. Finalement, la troisième phase se caractérise par une augmentation du taux de fluage et cela a pour conséquence un changement de dimension de la section alors que le matériau se détériore jusqu'à atteindre la rupture.

De ces trois phases du phénomène de fluage, nous nous intéresserons particulièrement aux lois de comportement des matériaux qui obéissent au fluage primaire et secondaire. Dans tous les cas de notre étude, le massif rocheux n'atteint jamais la rupture.

2.1.1 Loi de fluage secondaire

La particularité d'une loi de comportement de fluage secondaire est le taux de fluage constant dans le temps. La loi de Maxwell représente bien ce comportement. Le modèle rhéologique mécanique de cette substance est un regroupement en série d'un ressort et d'un piston (figure 2.2). Lorsque ce système est soumis à une force, l'allongement total du système est égal à la somme des allongements des éléments. Par analogie, nous pouvons écrire l'équation suivante (Gill, 1983) :

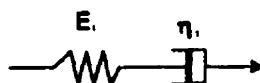


Figure 2.2 Modèle rhéologique de la loi de comportement de Maxwell

$$e_y(t) = \frac{S_y}{2E_1} + \frac{S_y t}{2\eta_1} \quad (11)$$

où E_1 = constante du ressort

η_1 = constante du piston

2.1.2 Loi de fluage primaire

Une loi de fluage primaire est identifiable à son taux de fluage décroissant. Nous allons étudier deux lois de comportement des matériaux qui correspondent à ce type de comportement : la loi de Zener et la loi de puissance ou Maxwell non-linéaire.

Le modèle rhéologique mécanique de Zener est composé d'un piston et d'un ressort montés en parallèle, le tout relié en série avec un ressort (figure 2.3). Le comportement de cette loi est défini mathématiquement par l'équation suivante (Gill, 1983):

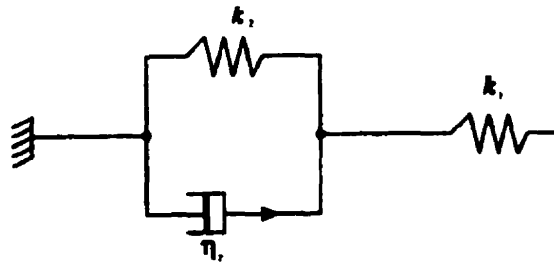


Figure 2.3 Modèle rhéologique de la loi de comportement de Zener

$$e_y(t) = \frac{S_y}{2k_1} + \frac{S_y}{2k_2} \left(1 - \exp^{-\frac{k_2 t}{\eta_2}} \right) \quad (12)$$

où k_1 et k_2 = constantes des ressorts

η_2 = constante du piston

La loi de puissance peut être associée à un modèle rhéologique similaire à celui de Maxwell. La seule différence réside dans le piston qui a un comportement non-linéaire (figure 2.4).

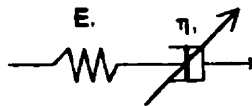


Figure 2.4 Modèle rhéologique de la loi de comportement loi de puissance

La loi de puissance, dans sa forme uniaxiale, est donnée par l'équation suivante (Hult, 1966):

$$\varepsilon^c = \lambda \sigma^n t^w$$

où ε^c = déformation uniaxiale de fluage

σ = contrainte appliquée

w, n, λ = constantes de fluage

Lorsqu'appliquée à un état multi-axial de contrainte, cette loi est fréquemment exprimée sous la forme déviatorique suivante :

$$\varepsilon_e^c = \lambda \sigma_e^n t^w \quad (14)$$

où

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

où σ_e = contrainte équivalente de von Mises

ε_e^c = déformation de fluage équivalente de von Mises

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = contraintes principales définissant l'état de contrainte en un point

Le paramètre λ est exprimé par (Ladanyi et Johnston, 1973) :

$$\lambda = \left(\frac{\varepsilon_c}{w} \right)^w \left(\frac{1}{\sigma_c} \right)^n \quad (17)$$

où ε_c = taux de fluage de référence par rapport auquel la contrainte σ_c est définie

Si $n = w = 1$ dans les équations définies précédemment, la loi de puissance (ou Maxwell non-linéaire) devient une loi de fluage secondaire. Le taux de fluage est constant et la loi de puissance devient équivalente à la loi de comportement de Maxwell linéaire.

2.2 Le comportement du soutènement

Il existe plusieurs types de soutènements : recouvrement de béton, câbles d'ancrage, structures mixtes, ... Hoek et Brown (1980) ont fait une revue exhaustive des différentes équations pour le calcul des pressions à l'interface massif-soutènement. Pour cette étude, nous avons choisi d'utiliser un revêtement monolithique de béton dont la courbe de réaction s'obtient par analogie avec les cylindres à paroi épaisse dont le comportement est élastique. Il s'agit d'une structure simple, couramment utilisée en pratique et dont nous connaissons bien le comportement. La figure 2.5 montre une section droite d'un tel cylindre ainsi que les symboles utilisés dans les équations qui définissent les contraintes radiale et tangentielle et le déplacement radiale (Bazergui et al., 1987)

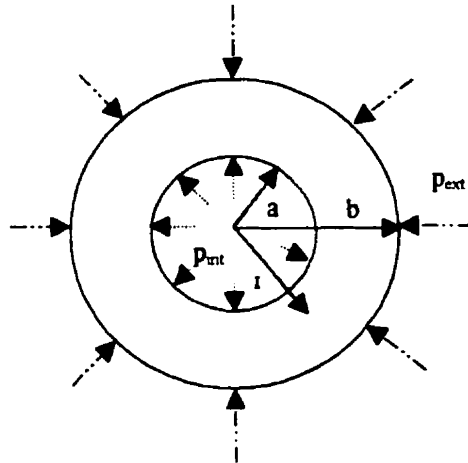


Figure 2.5 Cylindre à paroi épaisse sous pression

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_{int} - b^2 p_{ext}}{b^2 - a^2} - \frac{(p_{int} - p_{ext}) a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \quad (18)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 p_{int} - b^2 p_{ext}}{b^2 - a^2} + \frac{(p_{int} - p_{ext}) a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \quad (19)$$

$$U = \frac{1 - \nu'}{E'} \left(\frac{a^2 p_{int} - b^2 p_{ext}}{b^2 - a^2} \right) r + \frac{1 + \nu'}{E'} \left(\frac{(p_{int} - p_{ext}) a^2 b^2}{r (b^2 - a^2)} \right) \quad (20)$$

où σ_r = contrainte radiale

σ_θ = contrainte tangentielle

U = déplacement radial

ν' = coefficient de Poisson du béton du soutènement

E' = module de Young du béton du soutènement

a = rayon interne du cylindre

b = rayon externe du cylindre

r = distance radiale

p_{int} = pression interne

p_{ext} = pression externe

Comme nous l'avons vu précédemment, le soutènement peut être chargé de trois façons. Dans notre cas, la pression extérieure ne viendra que du comportement différé du massif et la pression interne sera considérée nulle.

Pour l'étude que nous avons faite, la rigidité du soutènement, définie comme le rapport entre la pression et le déplacement à l'extrados, joue un rôle important. Pour un cylindre de béton à paroi épaisse, elle est donnée par l'équation suivante pour un état de déformation plane (Bazergui et al., 1987):

$$K_b = \frac{1}{D} = \frac{E}{1+\nu'} \left[\frac{\frac{b^2}{a^2} - 1}{1 + (1 - 2\nu') \frac{b^2}{a^2}} \right] \quad (21)$$

où K_b = rigidité du soutènement

D = inverse de la rigidité du soutènement

2.3 Modèles de calcul de pression sur le soutènement

Pour calculer la pression à l'interface massif-soutènement, nous pouvons recourir à quatre différentes approches : empirique, analytique, numérique et graphique. Nous verrons en détail les avantages et les inconvénients de ces approches.

2.3.1 Approche empirique

Une approche empirique pour le design est essentiellement basée sur des observations *in-situ* ou sur des mesures faites sur un échantillon de roc type. Les méthodes les plus connues pour ce type de design sont celles basées sur les classifications géomécaniques. Les caractéristiques utilisées sont, par exemple, l'espacement des fissures, le nombre de fissures, la qualité du massif, etc. Le système

RSR (Wickham et al., 1972 et 1974), le système RMR (Bieniawski, 1973, 1974, 1976, 1979, 1988 et 1989), le système Q (Barton et al., 1974 et 1975, Barton, 1976 et 1988) et la méthode de Terzaghi (1946) sont quelques-unes des approches empiriques de design de soutènement des tunnels.

Un des avantages de ce genre d'approche est la possibilité de faire un design avec un minimum d'informations. Les renseignements sont faciles à trouver et rapidement accessibles. L'application en est généralement très simple et rapide.

Les inconvénients d'un design empirique sont nombreux. Premièrement, les informations utilisées sont succinctes et peuvent ne pas tenir compte des propriétés mécaniques de la roche. Deuxièmement, leur application est limitée à des cas similaires à ceux déjà étudiés. De plus, l'aspect de l'évolution des propriétés du massif dans le temps ou les interactions entre le massif et le soutènement sont des éléments qui n'interviennent pas dans le design empirique. Donc, ce genre d'approche ne devrait être utilisé que pour faire un design très préliminaire et ce, pour des massifs rocheux ne présentant pas un comportement différé.

2.3.2 Approche analytique

L'approche analytique consiste à trouver des distributions de contraintes et de déplacements dans un milieu donné pour une géométrie donnée et des conditions données de chargement qui satisfont :

- Les équations différentielles d'équilibre
- Les équations constitutives des matériaux (massif et soutènement)
- Les conditions aux frontières et les conditions initiales
- Les relations de compatibilité déformation-déplacement

Les équations constitutives pour les matériaux impliqués sont l'élasticité linéaire pour l'anneau de béton formant le soutènement et les trois lois de fluage présentées à la section 2.1 pour les massif rocheux.

La pression et le déplacement à l'interface soutènement-massif sont les suivantes pour les trois loi de fluage étudiées :

Maxwell linéaire (Gill et Ladanyi ,1983) :

Pour $t < l$

$$P(t) = 0 \quad (22)$$

$$U(t) = p_0 b \left(\frac{\eta_1 + tE_1}{E_1 \eta_1} \right) \quad (23)$$

Pour $t \geq l$

$$P(t) = p_0 \left(1 - \exp \left(\frac{-E_1(t-l)}{\eta_1(1+DE_1)} \right) \right) \quad (24)$$

$$U(t) = p_0 b \left[\frac{\eta_1 + lE_1}{E_1 \eta_1} \right] + p_0 b D \left[1 - \exp \left(\frac{-E_1(t-l)}{\eta_1(1+DE_1)} \right) \right] \quad (25)$$

où $P(t)$ = pression à l'interface massif-soutènement en fonction du temps

$U(t)$ = déplacement radial de la paroi en fonction du temps

l = temps d'installation du soutènement

p_0 = pression initiale dans le massif

Zener (Gill et Ladanyi, 1987) :

Pour $t < l$

$$P(t) = 0 \quad (26)$$

$$\frac{U(t)}{b} = \frac{p_0}{k_1} \left[1 + \frac{k_1}{k_2} f(t) \right] \quad (27)$$

Pour $t \geq l$

$$P(t) = p_0 F_1(t) F_2(t) \quad (28)$$

$$\frac{U(t)}{b} = \frac{p_0}{k_1} \left[1 + \frac{k_1}{k_2} f(t_r) \right] + P(t) D \quad (29)$$

$$F_1(t) = \exp\left(\frac{-l}{t_r}\right) - \exp\left(\frac{-t}{t_r}\right) \quad (30)$$

$$F_2(t) = \frac{\frac{k_1}{k_2}}{\frac{k_1}{k_2} + 1 + Dk_1} \left\{ \frac{1 - \exp\left(\frac{-A(t-l)}{t_r}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-(t-l)}{t_r}\right)} \right\} \quad (31)$$

$$A = 1 + \frac{\frac{k_1}{k_2}}{1 + Dk_1} \quad (32)$$

$$t_r = \frac{\eta_2}{k_2} \quad (33)$$

$$f(t) = 1 - \exp\left(\frac{-t}{t_r}\right) \quad (34)$$

Loi de puissance (Ladanyi et Gill, 1984)

La solution analytique dans le cas d'un massif dont le fluage est caractérisé par la loi de puissance de l'équation 14, est donnée par :

$$P(t) = p_o \left[1 - (1 + t^*)^{-1/(n-1)} \right] \quad (35)$$

$$U(\tau) = \frac{P(t)}{K_b} \quad (36)$$

où

$$t^* = K_b B (n-1) \pi p_o^{n-1} \quad (37)$$

$$B = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(\frac{\sqrt{3}}{n} \right)^n \left(\frac{A}{\sigma_c^n} \right) \quad (38)$$

$$A = \left(\frac{\dot{\varepsilon}_c}{w} \right)^w \quad (39)$$

où τ = temps transformé

$U(\tau)$ = déplacement en fonction du temps transformé

Les équations 35 à 39 impliquent une construction de soutènement au temps $t=0^+$, c'est-à-dire que seules les déformations élastiques ne chargent pas ce dernier. Ladanyi (1980) propose, pour simuler un temps de construction $t > 0^+$, d'introduire un espace d'air entre la paroi du massif et l'extrados du soutènement. La dimension de cet espace d'air s'obtient de l'équation du déplacement radial des parois du soutènement qui s'applique lorsqu'il n'y a pas de soutènement en considérant le délai voulu entre le percement et la mise en charge du soutènement.

Dans le développement analytique menant aux équations 35 à 39, le massif rocheux est assimilé à un cylindre à paroi épaisse dont le rayon externe est considéré infini, soumis à un fluage stationnaire (absence de redistribution des contraintes) caractérisé par un taux de fluage constant du type :

$$\dot{\varepsilon}_c^c = \lambda \sigma_c^n \quad (40)$$

où ε_c^c = taux de fluage stationnaire

Afin d'appliquer cette solution à un massif présentant du fluage transitoire (équation 14), Ladanyi et Johnston (1973) ont procédé à une transformation du temps de la forme $\tau = t^w$ de tel façon que l'équation 14 devient :

$$\varepsilon_e^c = \lambda \sigma_e^n \tau \quad (41)$$

Dans cet espace temps transformé, le taux de fluage est constant et donné par :

$$\dot{\varepsilon}_e^c = \frac{d\varepsilon_e^c}{d\tau} = \lambda \sigma_e^n \quad (42)$$

Ainsi, l'équation 35 est basée sur l'existence d'un état stationnaire de contrainte dans le massif (pas de redistribution de contraintes). Or dans le cas d'un matériaux présentant du fluage transitoire, cette hypothèse n'est jamais vérifiée et c'est seulement pour des temps très longs que la phase de redistribution de contraintes est négligée.

Le design du soutènement avec l'approche analytique demande une connaissance approfondie du problème à traiter. Donc, pour être utilisable, les solutions analytiques requièrent plusieurs simplifications sur le comportement du massif, la géométrie du problème et les conditions frontières. En pratique, il est rare que l'on puisse appliquer l'approche analytique dans sa totalité étant donné sa complexité.

2.3.3 Approche numérique

Le design de soutènement par l'approche numérique est la solution à la complexité de calcul de l'approche analytique. Les méthodes numériques peuvent être divisées en trois classes : celles qui demandent des approximations sur le domaine d'étude, les méthodes différentielles continues, celles qui se limitent aux

approximations seulement aux frontières, les méthodes intégrales continues, et les méthodes hybrides, les méthodes discontinues.

Les approches par différences finies ou par éléments finis sont toutes deux des méthodes différentielles continues qui requièrent des approximations physiques et numériques sur le domaine d'étude. Ce sont des approches particulièrement bien adaptées pour l'étude de matériaux ayant un comportement non-linéaire ou subissant des déformations plastiques.

Le design de soutènement par l'approche numérique fait souvent appel à des outils de calcul puissants. De nombreux logiciels sont disponibles sur le marché : SAP90, PHASES, COSMOS, FLAC,... Ils emploient majoritairement des méthodes différentielles continues. Nous avons choisi de travailler avec le logiciel FLAC.

FLAC est un logiciel d'analyse de contraintes basé sur les différences finies particulièrement adapté aux problèmes géotechniques. La structure à analyser implique la construction d'un modèle et ce modèle est divisé en éléments. Les conditions aux limites appropriées sont appliquées au modèle. Il génère donc, pour chaque élément, des équations de différences finies basées sur la méthode de Wilkin.

FLAC utilise le schéma de calcul montré à la figure 2.6 :

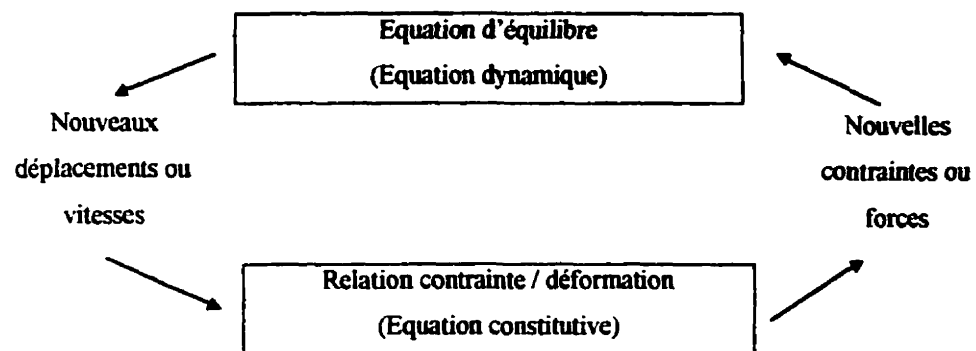


Figure 2.6 Schéma de calcul de FLAC

La procédure utilise dans un premier temps les équations dynamiques pour déduire les nouvelles vitesses et déplacements, des contraintes et forces. Alors, le taux de déformation est déduit des vitesses et les nouvelles contraintes, du taux de déformation. Le logiciel compte une étape de calcul pour chaque boucle effectuée. Les boucles se répètent jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint, i.e. jusqu'à ce que la répétition d'une boucle n'amène pas de changement supérieur à une limite fixée par l'utilisateur aux valeurs calculées entre deux boucles consécutives (figure 2.6). Il faut toutefois ajouter que FLAC n'est pas une boîte noire qui donne la solution. Les résultats numériques nécessitent toujours une certaine interprétation et l'utilisateur doit toujours garder un esprit critique face à ceux-ci.

Les avantages des solutions numériques sont nombreux. Les logiciels nous permettent habituellement une grande flexibilité : possibilité de considérer un milieu anisotrope, étudier l'influence d'une séquence d'excavation, étudier le problème en trois dimensions,... De plus, avec les développements rapides de la technologie, des outils de calcul performants sont plus facilement accessibles pour travailler avec les approches numériques.

Les inconvénients du design de calcul par l'approche numérique sont aussi importants. Les logiciels de calcul et le matériel informatique sont coûteux. Certains logiciels peuvent être peu conviviaux. De plus, la validation du modèle est toujours nécessaire. Donc, il faut obligatoirement se référer à une solution analytique pour au moins un cas étudié. De plus, l'interprétation des résultats peut être, dans certains cas, ardue.

2.3.4 Approche graphique

L'approche graphique de design de soutènement permet d'arriver à une solution optimale rapidement. Pour faire le design du soutènement avec cette

approche, il faut tracer la ligne caractéristique du massif ainsi que la courbe de réaction du soutènement à l'aide soit des équations analytiques ou de solutions numériques et de trouver le point d'équilibre. Cette méthode est appelée convergence-confinement.

La méthode convergence-confinement a été proposée vers la fin des années cinquante pour faciliter le dimensionnement des soutènements artificiels (Laufer et Seeber, 1961) pour des cas simples : des tunnels cylindriques à section circulaire droite percés dans des massifs rocheux ayant un comportement élastique linéaire et isotrope dont le champ de contraintes préalables est hydrostatique.

Dans le cas de l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle, la courbe caractéristique du massif est tracée en faisant varier la pression p_i (à la paroi de l'excavation) d'une valeur initiale p_o jusqu'à une valeur nulle et en calculant, pour chaque valeur de p_i le déplacement radial dans la paroi, u_i .

Tant que la pression interne p_i est inférieure à p_{icr} , la réponse du massif est élastique et l'équation des lignes caractéristiques est déterminée par la théorie de Lamé :

Pour $p_{icr} < p_i < p_o$:

$$\frac{u}{b} = (p_o - p_i) \frac{(1 + \nu)}{E} \quad (43)$$

où p_{icr} = pression critique

p_i = pression donnée

La valeur de p_{icr} dépend de la loi constitutive du massif (Brown et al, 1983). Pour des valeurs de p_i inférieures à p_{icr} , la ligne caractéristique n'est plus linéaire.

C'est avec cette équation que les courbes de réaction du massif, dans le diagramme d'interaction, sont tracées. Cependant, nous avons vu que plusieurs facteurs influencent la convergence, facteurs que cette équation ne prend pas en considération. Heureusement, nombre de chercheurs ont tenté de développer cette méthode pour en faire un outil de design plus complet. Les recherches se sont effectuées suivant deux champs d'étude : les effets à court terme et les effets à long terme.

Puisque la vitesse d'avancement du front de taille est l'un des facteurs qui influencent le plus la convergence, plusieurs se sont attardés à l'effet de la convergence instantanée (par exemple Lombardi 1973, 1974, 1979 et Panet 1976, 1979). Notons que parmi ces derniers, certains considèrent aussi les effets de la redistribution des contraintes à proximité du front de taille. Cependant, dans notre projet, nous considérons que le front de taille est à une distance suffisamment grande pour qu'il n'ait plus aucune influence sur la convergence observée.

Le second champ d'étude est celui des effets à long terme et de ses impacts sur le diagramme d'interaction. Le premier à soulever les répercussions du temps fut Ladanyi (1974). Pour tenir compte du passage des ans, Ladanyi a fait intervenir la dégradation des propriétés de la roche du massif dans le temps, la déformabilité augmentant et la résistance diminuant. En utilisant la notion de détérioration des propriétés du massif dans la méthode convergence-confinement, le diagramme d'interaction comporte au moins deux courbes caractéristiques; la première considérant les propriétés à court terme et la seconde, celles à long terme. Selon la loi de comportement utilisée pour représenter le comportement du massif, plusieurs courbes intermédiaires peuvent être calculées, puisqu'il s'agit simplement de tracer les nouvelles lignes caractéristiques en substituant les nouvelles valeurs des propriétés du massif dans les équations appropriées. Toutes ces lignes

caractéristiques tracées pour des temps différents sont appelées isochrones (figure 2.7). La notion d'isochrone a évolué au fil des recherches (Ladanyi 1980, Brown et al. 1983) pour introduire les notions de fluage dans l'évolution des propriétés du massif. Pour obtenir ces isochrones, des solutions analytiques sont généralement utilisées.

Pour un temps t donné, les isochrones correspondant aux trois lois de fluage considérées sont obtenues en faisant varier p_i de p_0 à zéro dans les équations suivantes :

Maxwell linéaire (Gill et Ladanyi, 1983)

$$\frac{U(t)}{b} = (p_0 - p_i) \left[\frac{\eta_1 + tE_1}{E_1\eta_1} \right] \quad (44)$$

Zener (Gill et Ladanyi, 1987)

$$\frac{U(t)}{b} = (p_0 - p_i) \left[\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} f(t) \right] \quad (45)$$

où

$$f(t) = 1 - \exp\left(\frac{-t}{t_R}\right) \quad (46)$$

Loi de puissance (Ladanyi et Gill, 1984)

$$\frac{U(t)}{b} = 3(p_0 - p_i)^n \tau = B(p_0 - p_i)^n t^n \quad (47)$$

où B est défini par l'équation 37

Cette approche ne tient pas compte de l'action du soutènement sur le massif lors de l'obtention des isochrones. Elle est identifiée dans la suite comme l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle.

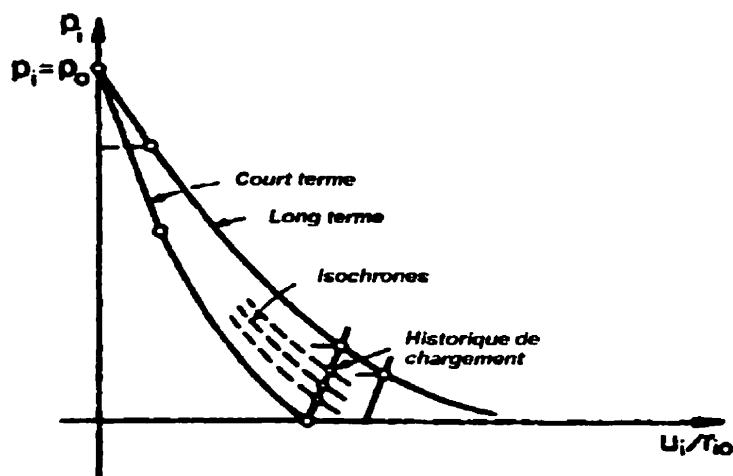


Figure 2.7 Diagramme d'interaction montrant des lignes caractéristiques isochrones (Ladanyi, (1974))

Bien que des résultats d'essai in-situ démontrent l'importance du phénomène (Kaiser 1980), l'aspect de l'historique de chargement du massif n'était toujours pas considéré par la méthode convergence-confinement. Effectivement, l'hypothèse implicite de la méthode, telle qu'utilisée jusqu'alors, est que la réponse du massif rocheux est indépendante de son historique de déformation. Toutefois, une telle hypothèse est justifiée uniquement si le massif est élastique et qu'aucune portion de ce dernier n'entre en plasticité ou ne se déforme dans le temps. La méthode convergence-confinement conventionnelle considère que toute la pression du soutènement est appliquée immédiatement sur le massif (figure 2.8). Gill et Ladanyi (1983), en utilisant le modèle rhéologique de Maxwell, montrent que l'augmentation de pression du soutènement sur le massif est très différente de ce que sous-entend la méthode conventionnelle. Cet écart donne des points d'équilibre qui tendent à sous-

estimer les poussées sur le soutènement (figure 2.9), sauf pour des temps infiniment grands.

L'utilisation de l'approche graphique convergence-confinement requiert la connaissance de l'historique de poussée sur le soutènement pour obtenir la courbe de réaction exacte du massif rocheux lorsque celui-ci montre un fluage, mais cette information n'est pas disponible antérieurement au tracé du diagramme d'interaction. Donc, Gill et Ladanyi (1983) ont proposé une approche qui permet d'utiliser la méthode convergence-confinement et d'arriver à des solutions, sinon exactes, tout au moins acceptables d'un point de vue design.

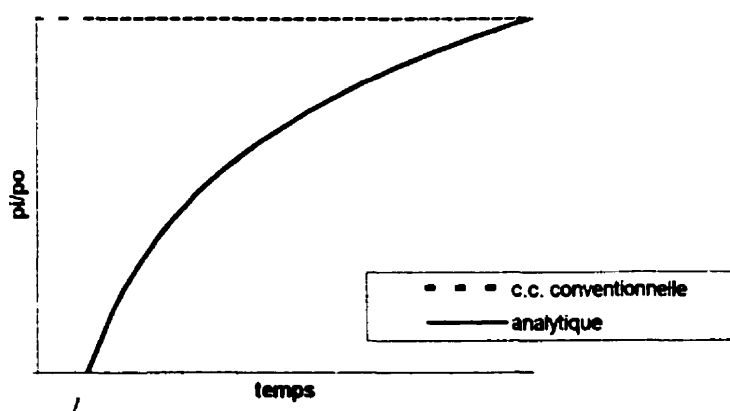


Figure 2.8 Historique de chargement postulé avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparativement à l'historique obtenu avec l'approche analytique

Puisque le problème de la méthode conventionnelle est de ne pas considérer correctement l'historique de pression du soutènement sur le massif, Gill et Ladanyi en ont modifié l'approche. Ils préconisent donc que la pression ne s'exerce plus au départ mais seulement au moment de l'installation du soutènement. De plus, puisque le soutènement n'entre en fonction que progressivement, l'incrément de pression

devrait se faire de la même façon. En postulant, lors d'un premier cycle itératif l'historique de poussée du type rampe montrée à la figure 2.10 et en approximant cette rampe par une série d'incrément finis, Gill et Ladanyi (1983) proposent l'équation suivante pour l'obtention des isochornes lorsque le massif rocheux se comporte comme une substance de Maxwell linéaire.

$$u_t = bp_o \left(\frac{\eta_1 + tE_1}{E_1 \eta_1} \right) - \frac{p_t b}{h} \sum_{i=1}^h \left(\frac{\eta_1 + t_i E_1}{\eta_1 E_1} \right) \quad (48)$$

$$t_i = t - l - (2i - 1) \frac{\Delta t}{2} \quad (49)$$

$$\Delta t = \frac{t - l}{h} \quad (50)$$

où h = nombre d'échelons

L'équation 48 s'obtient de l'équation 44 en considérant l'historique de chargement de la figure 2.10.

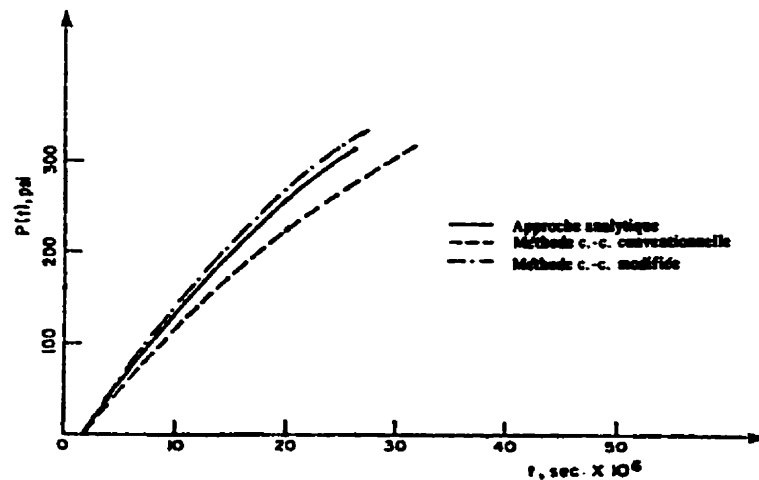


Figure 2.9 Historique de chargement du soutènement calculé d'après les différentes approches pour la loi de comportement de Maxwell (Gill et Ladanyi, 1983)

Cette approche a donné des résultats jugés satisfaisants (figure 2.9 et 2.11) par Gill et Ladanyi (1983) après seulement un premier cycle d'itération pour les quelques cas étudiés. Ainsi, les points d'équilibre sont plus près des valeurs exactes mais en plus surestiment légèrement les résultats. Donc, en utilisant cette méthode, les designs seraient sécuritaires. Cette approche fut testée pour d'autres modèles rhéologiques : loi de puissance (Ladanyi et Gill, 1984) et modèle de Zener (Gill et Ladanyi, 1987), en adaptant les équations 45 et 47 pour l'obtention des lignes caractéristiques du massif par l'approche graphique convergence-confinement modifiée. Pour chacun des modèles, les résultats se sont avérés aussi bons que dans le premier cas étudié et, chaque fois, les points d'équilibre donnaient des pressions qui étaient égales ou supérieures aux valeurs exactes.

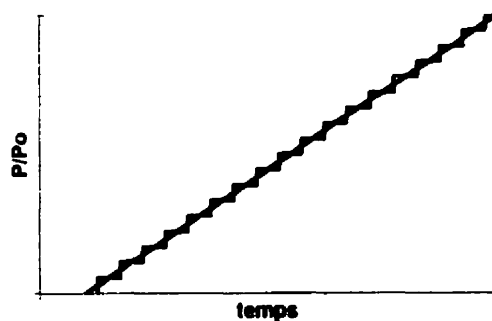


Figure 2.10 Historique de chargement du soutènement postulé avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée lors de la première itération

Les inconvénients sont semblables aux approches analytique et numérique en ce qui concerne la recherche des paramètres de base. Cependant, l'interprétation des résultats est beaucoup plus rapide avec l'approche graphique. L'avantage principal de l'utilisation d'un design par approche graphique est avant tout la rapidité

Chapitre 3

Méthodologie

Les travaux précédents de Ladanyi et Gill ont démontré que l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle peut, dans certaines conditions, sous-estimer la pression appliquée sur le soutènement lors du fluage du massif. Ces mêmes travaux ont démontré que, pour les cas étudiés, l'approche graphique convergence-confinement modifiée permet, du moins en partie, de prendre en considération les effets de l'historique de déformations sur les pressions appliquées au soutènement.

Cependant, ces constatations sont basées sur un nombre restreint de cas. Afin de s'assurer que ces dernières peuvent être généralisées à d'autres conditions, nous avons effectué une étude paramétrique qui comporte les étapes suivantes : validation des modèles numériques, choix de la procédure pour l'application de l'approche graphique convergence-confinement modifiée, choix des cas étudiés et analyse des résultats.

3.1 Validation des modèles numériques

Pour simuler une excavation circulaire cylindrique, FLAC offre différents modèles. Pour tous les cas que nous étudierons, nous utiliserons la même structure de fichier. Il est possible d'utiliser deux modèles dans le calcul des déplacements et des contraintes à l'interface du tunnel : axisymétrique et déformation plane. Le modèle axisymétrique est simple mais limite quelque peu les possibilités de variation de paramètres (ex. : pas d'anisotropie du champ de contraintes préalable possible). D'un autre côté, l'approche par les déformations planes permet une plus grande latitude

mais est un peu plus lourde à manipuler numériquement. Nous avons donc créé des fichiers de chaque type pour chacune des lois de fluage pour ainsi nous assurer de la concordance des résultats, tel qu'illustré sur les figures 3.1 et 3.2.

Après avoir effectué différentes vérifications, nous avons remarqué que les deux types de maillage donnent les mêmes résultats. Nous avons décidé de ne travailler qu'avec le modèle axisymétrique, pour réduire le temps de simulation. Nous pouvons le faire car une des hypothèse de base de l'étude est que l'état de contraintes préalable est isotrope. De plus, l'installation d'un soutènement est plus simple avec ce type de maillage.

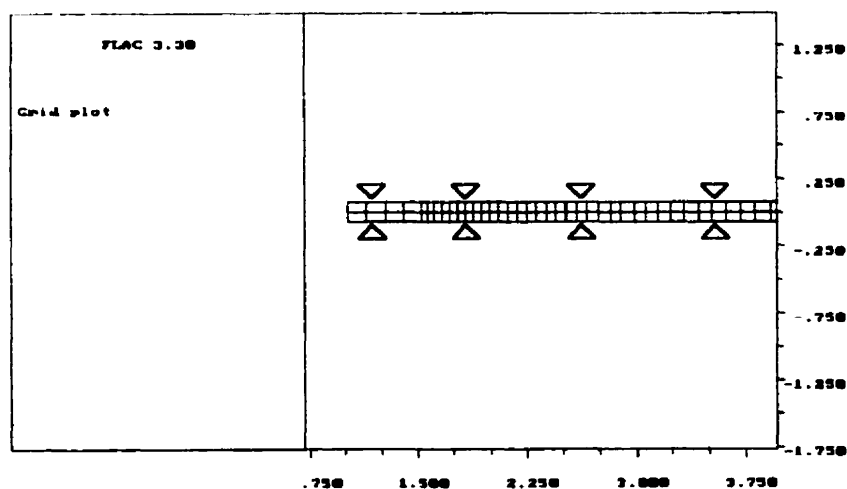


Figure 3.1 Modèle axisymétrique

La validation des modèles numériques utilisés s'est faite par comparaison des résultats obtenus avec ces derniers à ceux obtenus avec les solutions analytiques présentées à la section 2.3 et pour les données du tableau 3.1.

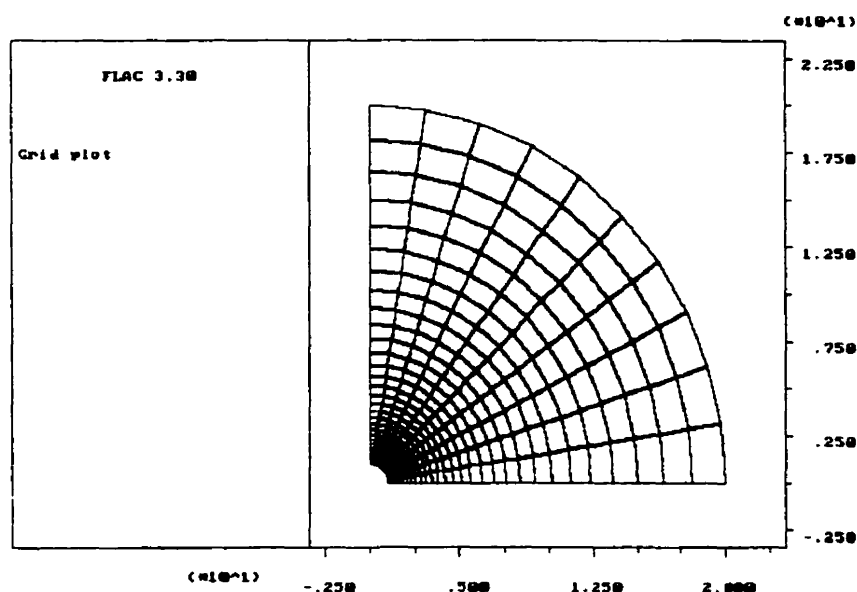


Figure 3.2 Modèle en déformation plane ou quart de modèle

Tableau 3.1 Données des cas de référence utilisées pour la validation des modèles numériques

Loi de comportement	Paramètres du massif	Rigidité du soutènement	P_0 (MPa)	a (m)	b (m)	Identification du cas
Maxwell linéaire (Gill et Ladanyi, 1983)	$E_1=11\,714$ MPa $\eta_1=8.27 \times 10^9$ kPa*sec	143.7 MPa	6.9	1.30	1.525	Flumax1
Zener (Gill et Ladanyi, 1987)	$k_1=4.138$ GPa $k_2=4.138$ GPa $\eta_1=8.27 \times 10^9$ kPa*sec $t_R=10$ sec	6.9 GPa	7.586	0.85	1	Fluzen1
Loi de puissance (Ladanyi et Gill, 1984)	$n=3.36$ $w=0.38$	3.842 GPa	10	0.85	1	Flupow1

3.2 Choix de la procédure pour l'application de la méthode convergence-confinement modifiée

Cette étape vise à :

- Déterminer si les lignes caractéristiques seront obtenues à partir des équations 44, 45 et 47 ou à l'aide du logiciel FLAC ;
- Etablir le nombre de pas à considérer lors des itérations à effectuer pour tenir compte de l'historique de chargement ;
- Etablir le nombre d'itérations à effectuer avec chaque cas.

3.3 Choix des cas étudiés

Les cas étudiés visent à mettre en lumière l'influence de la rigidité du soutènement et du massif (paramètres de fluage) sur les valeurs de pression au contact massif-soutènement. Les tableaux 3.2 à 3.4 identifient les cas étudiés et en présentent les caractéristiques.

Tableau 3.2 Synthèse des différents paramètres utilisés avec la loi de comportement de Maxwell

Identification du cas	Rayon externe (m)	p_0 (MPa)	E_1 (MPa)	η_1 (kPa*sec)	Rigidité du soutènement (MPa)
Flumax1	1.525	6.9	11 724	8.27×10^9	143.7
Flumax2	1.525	6.9	11 724	1.2×10^{10}	143.7
Flumax3	1.525	6.9	11 724	2.0×10^{10}	143.7
Flumax4	1.525	6.9	11 724	6.0×10^9	143.7
Rigmax1	1.525	6.9	11 724	8.27×10^9	200
Rigmax2	1.525	6.9	11 724	8.27×10^9	120
Rigmax3	1.525	6.9	11 724	8.27×10^9	100
Rigmax4	1.525	6.9	11 724	8.27×10^9	50

Tableau 3.3 Synthèse des différents paramètres utilisés avec la loi de comportement de Zener

Identification du cas	Rapport de a/b	p_0 (MPa)	k_1 (GPa)	k_2 (GPa)	η_2 (GPa*sec)	t_R (sec)	Rigidité du soutènement (GPa)
Fluzen1	0.85	7.586	4.138	4.138	41.38	10	6.9
Fluzen2	0.85	7.586	4.138	4.138	20.69	5	6.9
Fluzen3	0.85	7.586	4.138	4.138	10.345	2.5	6.9
Rigzen1	0.85	7.586	4.138	4.138	41.38	10	6.667
Rigzen2	0.85	7.586	4.138	4.138	41.38	10	3.333
Rigzen3	0.85	7.586	4.138	4.138	41.38	10	1.000
Rigzen4	0.85	7.586	4.138	4.138	41.38	10	0.100
Rigzen5	0.85	7.586	4.138	4.138	41.38	10	7.5

Tableau 3.4 Synthèse des différents paramètres utilisés avec la loi de comportement loi de puissance

Identification du cas	Rapport de a/b	p_0 (MPa)	n	w	Rigidité du soutènement (GPa)
Flupow1	0.85	10	3.36	0.38	3.842
Flupow2	0.85	10	2	0.38	3.842
Flupow3	0.85	10	4	0.38	3.842
Flupow4	0.85	10	3.36	0.6	3.842
Flupow5	0.85	10	3.36	1	3.842
Rigpow1	0.85	10	3.36	0.38	6.667
Rigpow2	0.85	10	3.36	0.38	3.333
Rigpow3	0.85	10	3.36	0.38	1.000
Rigpow4	0.85	10	3.36	0.38	0.100

Nous avons fait varier les propriétés du béton de part et d'autre des valeurs présentées pour les cas de référence en nous assurant que les propriétés mécaniques du béton étaient réalistes mais sans nous attarder à des cas particuliers de rigidité.

3.4 Analyse des résultats

Dans un premier temps, les résultats donnés par les approches graphiques convergence-confinement conventionnelle et modifiée seront comparés à ceux donnés par les équations analytiques pour les lois de comportement de Maxwell et Zener. Ceci permettra, d'une part, d'étudier les limites de l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle et d'autre part, de mettre en lumière la validation des approximations que donne l'approche graphique convergence-confinement modifiée.

Étant donné que pour la loi de puissance il n'existe pas de solution analytique exacte, la comparaison des résultats donnés par l'approche graphique convergence-confinement modifiée se fera avec les résultats de FLAC. Afin de s'assurer que les résultats des analyses de FLAC sont acceptables, des comparaisons seront faites avec les résultats obtenus avec l'approche analytique pour des temps longs.

Chapitre 4

Présentation des résultats

Ce chapitre présente les résultats obtenus en suivant la méthodologie énoncée au chapitre précédent.

4.1 Validation des modèles numériques

Trois lois de fluage sont disponibles à même le logiciel FLAC:

- loi viscoélastique classique (Maxwell)
- loi de puissance ($\dot{\varepsilon}_e = A\sigma_e^n$)
- une loi de fluage pour l'étude d'enfouissement de déchets nucléaires.

Deux des lois de comportement du massif que nous voulons étudier sont directement disponibles dans le logiciel. Pour les lois qui ne sont pas définies, Flac permet d'écrire son propre modèle de fluage. L'exemple du modèle de Burgers nous est fourni. Puisque la loi de Zener est un cas particulier de la loi de comportement de Burgers, nous pouvons facilement modéliser notre troisième loi de fluage.

Finalement, le dernier point à développer est le pas de temps à utiliser dans le calcul du fluage. Flac possède une fonction qui permet une sélection automatique de l'intervalle de temps. Les paramètres que nous devons fixer dans cette fonction sont : le plus petit intervalle de temps, le plus grand intervalle de temps et le facteur multiplicatif pour l'incrément de l'intervalle.

Puisque le fluage est plus rapide au début de l'application de la charge, il faut que l'intervalle de temps de départ soit suffisamment petit pour assurer la convergence. Cependant, si l'intervalle est trop petit nous aurons des difficultés à étudier le fluage sur les périodes qui nous intéressent. Il en va de même pour le plus grand intervalle, que nous avons choisi en fonction des durées que nous devons étudier. Enfin, le facteur multiplicatif a été choisi pour permettre un incrément suffisamment lent pour bien observer le phénomène de fluage, mais qui permet d'atteindre les temps de fluage maximum en un temps satisfaisant. Après différents essais, nous avons retenu les temps identifiés au tableau 4.1.

Tableau 4.1 Paramètres pour les intervalles de temps dans FLAC

	Intervalle minimum	Intervalle maximum	Facteur multiplicateur
Maxwell	2×10^{-4} sec	1×10^{-3} sec	1.5
Zener	2×10^{-12} an	1×10^{-4} an	1.5
Loi de puissance	2×10^{-8} an	5×10^{-5} an	1.5

Nous avons décrit les éléments de base les plus importants de nos fichiers, le reste n'est que langage de programmation. Vous trouverez des exemples de fichiers dans l'Annexe 1 – Structure des fichiers pour l'approche numérique.

FLAC donne la valeur des contraintes au centre d'un élément. Cependant, nous avons besoin de la pression à l'interface entre le béton et le massif rocheux. Pour l'obtenir, nous avons extrapolé, avec Excel, dans les deux milieux. Pour le béton, nous avons utilisé toutes les pressions disponibles, tandis que pour le massif, seul les 20 premiers éléments ont servi pour le calcul.

Pour le massif ayant un comportement de loi de puissance, la validation est plus difficile car il n'existe aucune solution analytique exacte. Malgré tout, nous avons procédé à différentes vérifications. Pour les temps les plus longs, les résultats

sont similaires à ceux obtenus par les équations de l'article de Ladanyi et Gill (1984). Nous avons donc déduit que la modélisation est valable.

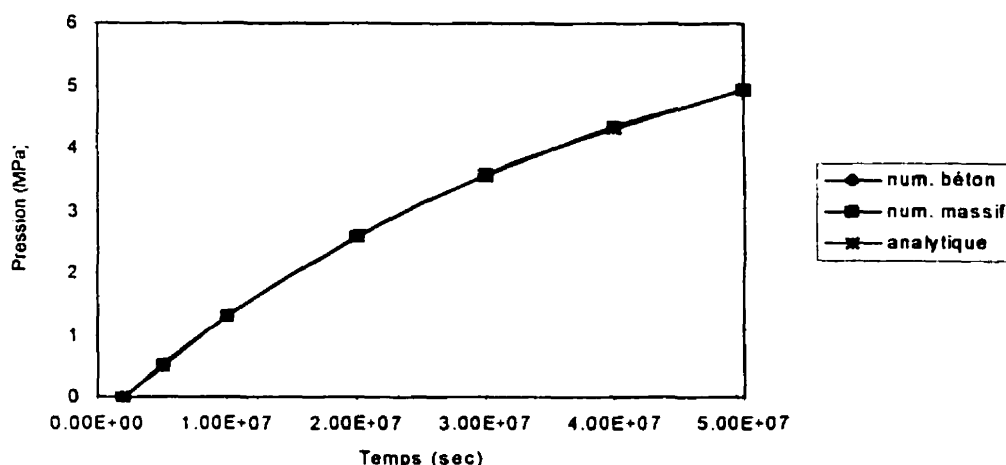


Figure 4.1 Pression au contact soutènement massif - Validation du modèle de la loi de comportement de Maxwell pour l'approche numérique par le graphique d'historique de chargement avec les valeurs de l'approche analytique, pour les données de l'article de Gill et Ladanyi (1983)

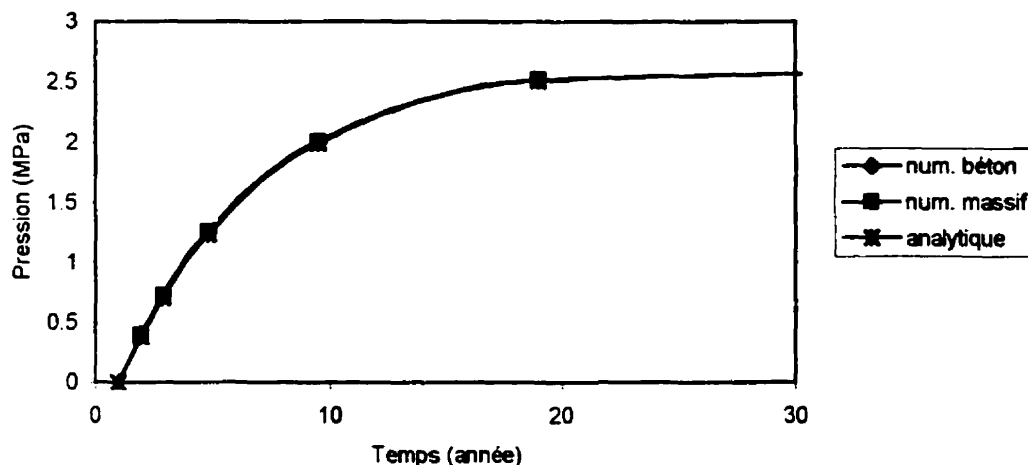


Figure 4.2 Pression au contact soutènement massif - Validation du modèle de loi de comportement de Zener pour l'approche numérique par le graphique d'historique de chargement avec les valeurs de l'approche analytique, pour les données de l'article de Gill et Ladanyi (1987)

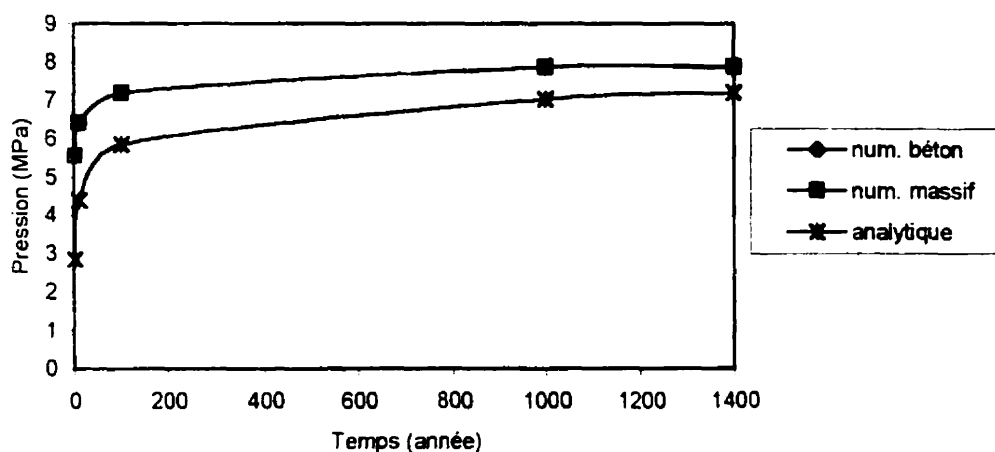


Figure 4.3 Pression au contact soutènement massif - Validation du modèle de loi de comportement loi de puissance pour l'approche numérique par le graphique d'historique de chargement avec les valeurs de l'approche analytique, pour les données de l'article de Ladanyi et Gill (1984)

Les figures 4.1 à 4.3 présentent une comparaison entre les résultats obtenus avec les modèles numériques et les modèles analytiques (voir section 2.3) pour les données du tableau 3.1.

Les figures 4.1 et 4.2 montrent que les modèles numériques élaborés reproduisent très bien les résultats des modèles analytiques pour les lois de Maxwell et de Zener. Quant à la loi de puissance, la figure 4.3 montre une divergence qui découle du fait que la solution analytique ne tient pas compte de la redistribution de contraintes qui se produit lors du fluage. La grandeur et la durée de la redistribution des contraintes dépendent de plusieurs facteurs, notamment des paramètres de fluage du matériau. Nous avons procédé à différentes vérifications, dans tous les cas cette différence s'amenuise au fur et à mesure que la solution numérique tend vers l'état stationnaire.

4.2 Choix de la procédure

4.2.1 Obtention des lignes caractéristiques du massif

Après diverses considérations, il a été jugé plus efficace d'obtenir les lignes caractéristiques du massif rocheux, pour l'approche graphique convergence-confinement modifiée, à l'aide du logiciel FLAC plutôt qu'à partir des équations 44, 45 et 47. De plus, dans le cas de la loi de puissance, cette façon de procéder a permis d'obtenir des lignes caractéristiques modifiées qui tiennent compte de la redistribution des contraintes dans le massif. Des exemples de fichiers pour chaque loi de comportement se trouvent à l'Annexe II.

4.2.2 Influence du nombre de pas

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la méthode convergence-confinement modifiée implique une série d'incréments de charge. Pour la première itération, il est postulé que le chargement suit une droite en partant de zéro au temps d'installation du soutènement (I) pour atteindre la pression initiale dans le massif (p_0) au temps étudié, en effectuant des incréments de charge constants. Pour étudier l'influence du nombre d'incréments de charge par itération sur l'historique de chargement du soutènement, nous avons choisi différents nombres de pas :

Tableau 4.2 Nombre d'incréments étudiés avec chacun des modèles de fluage

Nombre de pas	Maxwell	Zener	Loi de puissance
10	X	X	X
20	X	X	X
30		X	X
50	X	X	X
75	X		
100	X		

Les lois de comportement de Zener et de loi de puissance sont plus complexes que celle de Maxwell. C'est pourquoi nous avons dû restreindre le nombre

d'incréments de charge par itération, pour réduire le temps de simulation. Malgré tout, cet éventail de valeurs de pas de pression nous permettra de vérifier l'influence réelle de ce paramètre sur la première itération.

Les résultats que FLAC nous donne à la suite des simulations nous permettront de bâtir les courbes caractéristiques du massif pour le diagramme d'interaction. Avec la courbe de réaction analytique du soutènement, nous pouvons trouver les pressions d'équilibre et ainsi déterminer l'historique de chargement.

Pour les modèles de Maxwell et de Zener, les lignes caractéristiques du massif ont été représentées par des droites dont les paramètres ont été déterminés dans Excel. Ainsi, avec l'équation de la courbe de réaction, nous avons pu trouver le point d'intersection facilement.

Pour la loi de puissance, cette approche n'est pas valable. Sur le diagramme d'interaction, le point d'intersection a été déterminé par interpolation linéaire entre la valeur de pression supérieure et la valeur de pression inférieure.

Les diagrammes d'interaction des figures 4.4 (Maxwell) et 4.6 (Zener) sont les résultats de simulations pour dix incréments de charge. Les simulations nous donnent les courbes de réaction du massif auxquelles nous avons superposé la courbe de réaction du soutènement pour obtenir les pressions d'équilibre qui nous permettront d'obtenir l'historique de chargement du soutènement. En répétant le processus tout en modifiant le nombre de pas, il est possible de tracer les graphiques des 4.5 et 4.7 et tirer les données des tableaux 4.3 et 4.4. Seuls les diagrammes d'interaction pour $h=10$, sont présentés mais tous les autres graphiques se trouvent dans l'Annexe III – Influence du nombre de pas.

Tout comme pour les autres lois de comportement, nous avons obtenu l'historique de chargement (figure 4.9) à partir des diagrammes d'interaction. Seul le diagramme d'interaction pour dix incréments de charge est présenté (figure 4.8), les autres résultats se trouvent à l'Annexe III. Le tableau 4.5 regroupe les résultats pour tous les pas de pression étudiés.

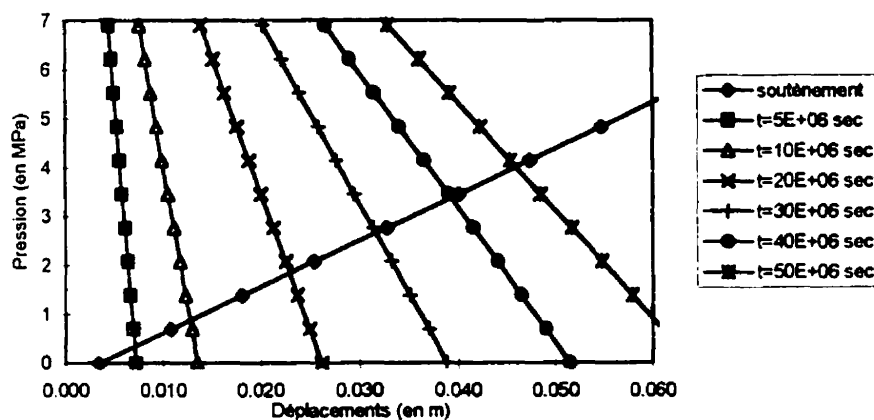


Figure 4.4 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la première itération

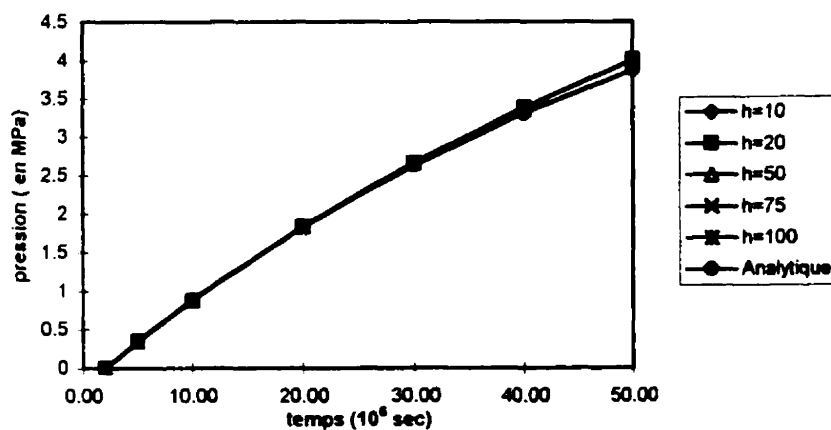


Figure 4.5 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence du nombre d'incrément de charge lors de la première itération

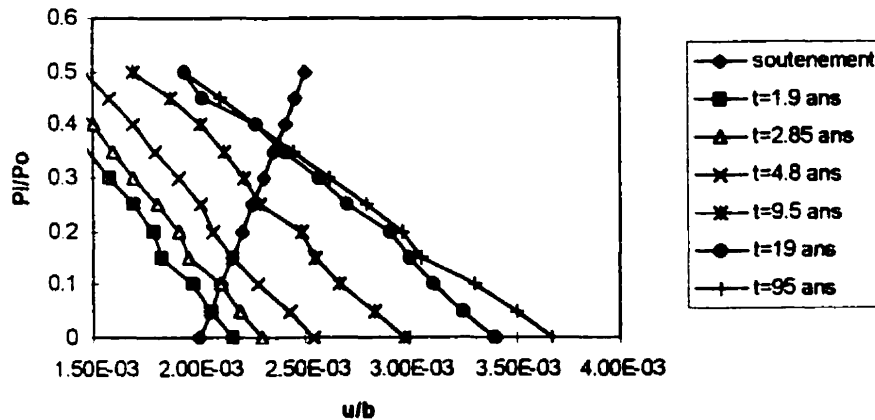


Figure 4.6 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la première itération

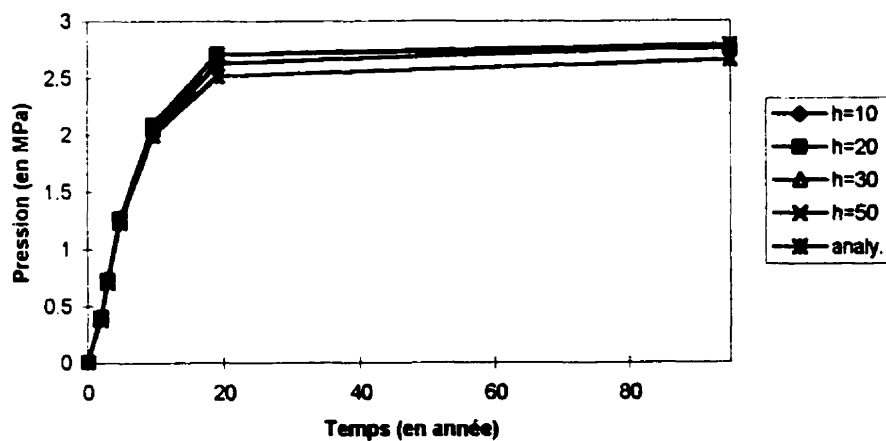


Figure 4.7 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence du nombre d'incrément de charge lors de la première itération

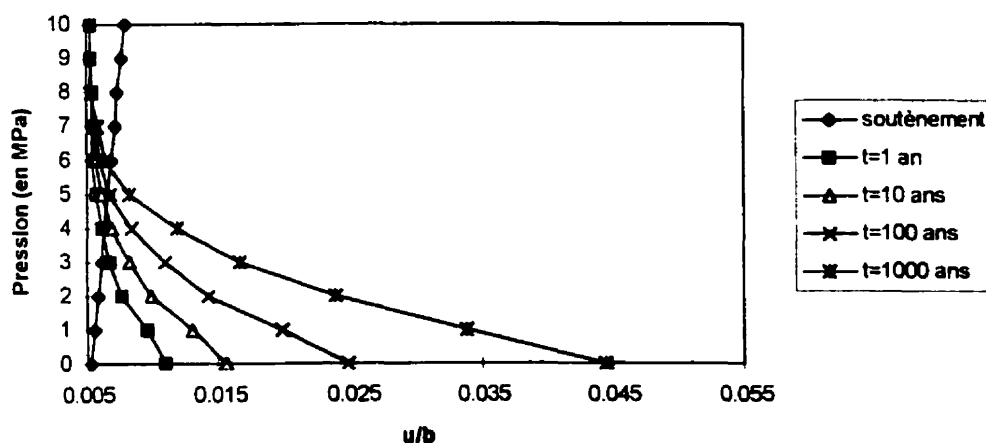


Figure 4.8 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la première itération.

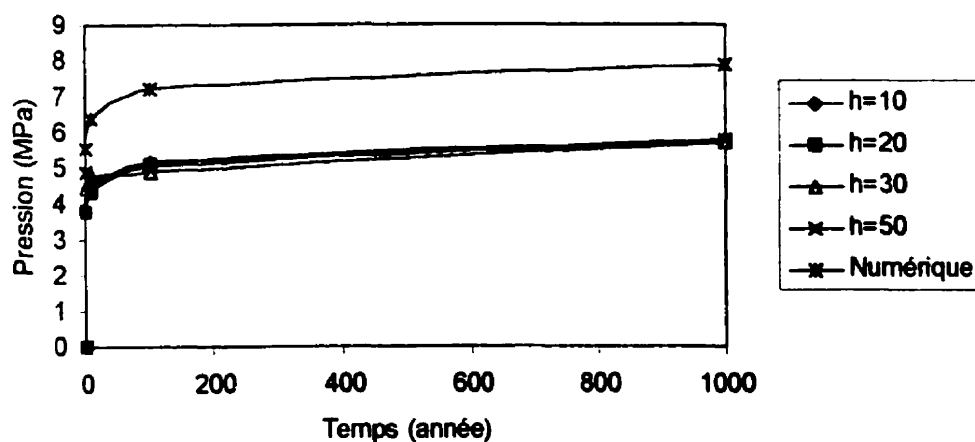


Figure 4.9 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence du nombre d'incrément de charge lors de la première itération

Tableau 4.3 Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence du nombre de pas lors de la première itération

Temps (sec)	Pression										anal. (MPa)
	h=10		h=20		h=50		h=75		h=100		
	mod. (MPa)	Ecart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	
2.E+06	0		0		0		0		0		0
5.E+06	0.34	-0.93	0.34	-0.68	0.34	-1.46	0.34	-1.12	0.34	-1.14	0.35
1.E+07	0.88	-0.58	0.88	-0.44	0.88	-0.71	0.88	-0.75	0.88	-0.60	0.89
2.E+07	1.83	0.06	1.84	0.17	1.83	0.05	1.83	0.05	1.84	0.08	1.83
3.E+07	2.66	0.99	2.66	1.04	2.66	0.98	2.66	0.98	2.66	0.98	2.63
4.E+07	3.38	2.15	3.38	2.13	3.38	2.11	3.38	2.11	3.38	2.10	3.31
5.E+07	4.01	3.47	4.01	3.45	4.01	3.51	4.01	3.50	4.01	3.50	3.87

*L'écart est calculé de la façon suivante: (valeur de l'approche-valeur de référence)/valeur de référence

Tableau 4.4 Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence du nombre de pas lors de la première itération

Temps (année)	Pression								
	h=10		h=20		h=30		h=50		anal. (MPa)
	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	
0.95	0		0		0		0		0
1.9	0.38	1.00	0.40	4.93	0.40	5.38	0.40	4.85	0.38
2.85	0.72	2.74	0.73	2.85	0.73	4.21	0.71	1.22	0.70
4.8	1.25	1.06	1.25	1.63	1.27	2.86	1.24	0.65	1.23
9.5	2.00	0.51	2.08	4.46	2.08	4.40	2.06	3.34	1.99
19	2.62	4.47	2.70	7.65	2.70	7.56	2.70	7.59	2.51
95	2.78	4.59	2.76	3.93	2.76	3.99	2.79	5.09	2.65

Tableau 4.5 Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence du nombre de pas lors de la première itération

Temps (année)	Pression								
	h=10		h=20		h=30		h=50		num. (MPa)
	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3.8	-31.7	3.79	-31.8	4.46	-19.8	4.91	-11.7	5.56
10	4.47	-30.2	4.35	-32.2	4.76	-25.7	4.56	-28.9	6.41
100	5.15	-28.5	5.13	-28.8	4.87	-32.3	5.06	-29.7	7.2
1000	5.79	-26.4	5.73	-27.2	5.74	-27.1	5.78	-26.6	7.87

4.2.3 Influence du nombre d'itérations

Pour toutes les lois de comportement, nous avons étudié l'influence d'une seconde itération. De plus, nous avons vérifié l'influence d'une troisième itération sur la loi de comportement loi de puissance. Pour effectuer une itération subséquente, nous devons utiliser l'historique de chargement de l'itération précédente. Pour toutes les lois de comportement de massif étudiées, l'historique de chargement est courbe. Les incréments de pression peuvent alors être faits à intervalles de temps égaux ou à pressions égales. Nous avons choisi de travailler en terme d'incrément de pression constants.

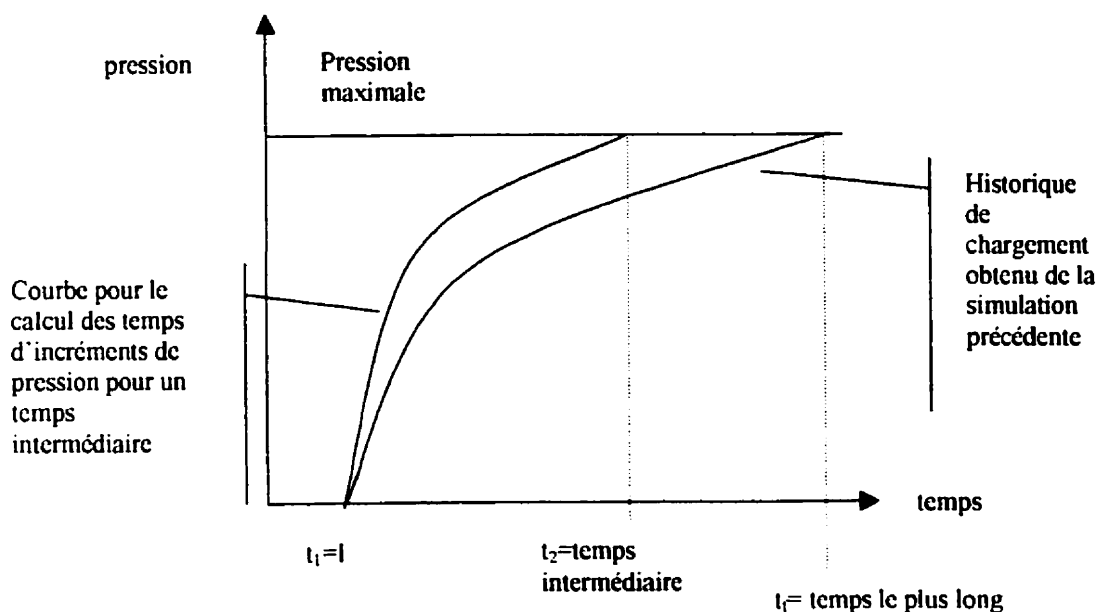


Figure 4.10 Description de la méthode de détermination de la fonction d'intervalles de temps pour les incréments de charge lors d'une seconde ou d'une troisième itération.

Pour chacun des modèles, il faut déterminer une fonction pour calculer les intervalles de temps auxquels seront faits les incréments de charge. Sur le graphique d'historique de chargement, nous avons fait passer une courbe de régression avec Excel. Cette étape nous permet de définir le type de comportement de la courbe (logarithmique, exponentielle, ...). Donc, connaissant le temps d'installation du soutènement où la pression est nulle ($t_1=l$, $p_1=0$) et la pression maximale obtenue à l'itération précédente au temps étudié ($t_2=t_i$, $p_2=p_m$), nous pouvons définir complètement la fonction de calcul du temps pour tous les temps intermédiaires à étudier (figure 4.10).

Finalement, la procédure de chargement a été conçue de telle façon que le temps d'installation du soutènement, la pression maximale à l'interface, le temps de

fluage et le nombre de pas de pression sont ajustables. Ainsi, notre procédure est polyvalente et nous permettra d'effectuer les différentes études décrites précédemment. Des exemples de fichiers se trouvent à l'Annexe II – Structure des fichiers pour l'approche graphique convergence-confinement modifiée.

Suite aux résultats obtenus par la première itération, nous avons procédé à la seconde itération. L'étude de l'influence d'une seconde itération s'est effectuée en deux parties : l'influence de la seconde itération proprement dite et l'influence du nombre de pas au sein d'une seconde itération. Pour ce qui est de la présentation des résultats, elle est très semblable à celle de l'étude du nombre de pas. Nous avons tout d'abord procédé au tracé du diagramme d'interaction pour les lois de comportement de Maxwell et de Zener (figures 4.11 et 4.13), desquels nous avons pu extraire l'historique de chargement du soutènement pour dix incréments de charge (figures 4.12 et 4.14). Finalement, nous avons regroupé tous les résultats dans les tableaux 4.6 et 4.7.

Pour faire ressortir clairement l'influence de la première et de la seconde itération, nous avons comparé, sur les mêmes graphiques, les résultats des deux itérations. Donc, les figures 4.19, pour la loi de comportement de Maxwell, et 4.20, pour la loi de comportement de Zener, illustrent l'influence des itérations.

Pour ce qui a trait à la loi de puissance, nous avons procédé à une seconde itération en suivant la même procédure que pour les autres lois de comportement de massif. Les résultats se trouvent aux figures 4.15 et 4.16 et au tableau 4.8. Puisque les résultats obtenus par une seconde itération sont encore éloignés de ceux obtenus numériquement, nous avons fait une troisième itération, toujours sur le même principe. Les figures 4.17 et 4.18 illustrent les résultats obtenus. Le tableau 4.9 regroupe les résultats détaillés pour cette troisième itération. Finalement, sur un

graphique d'historiques de chargement, nous avons superposé les résultats des trois itérations (figure 4.21).

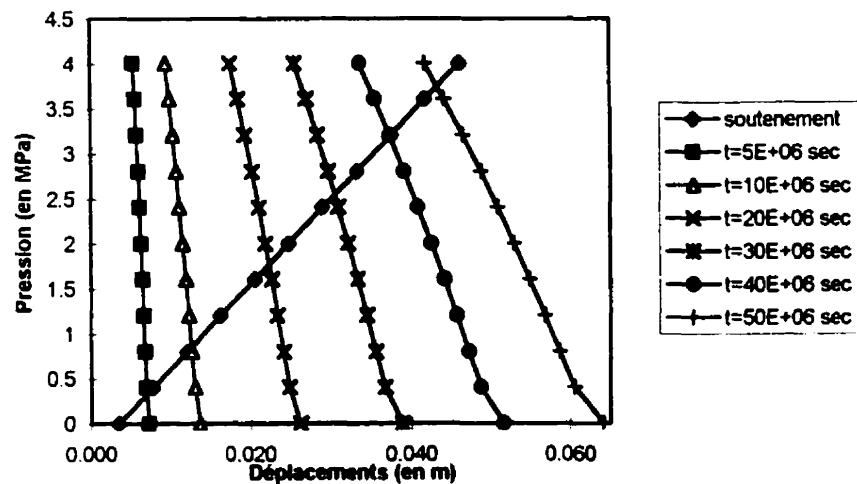


Figure 4.11 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la seconde itération

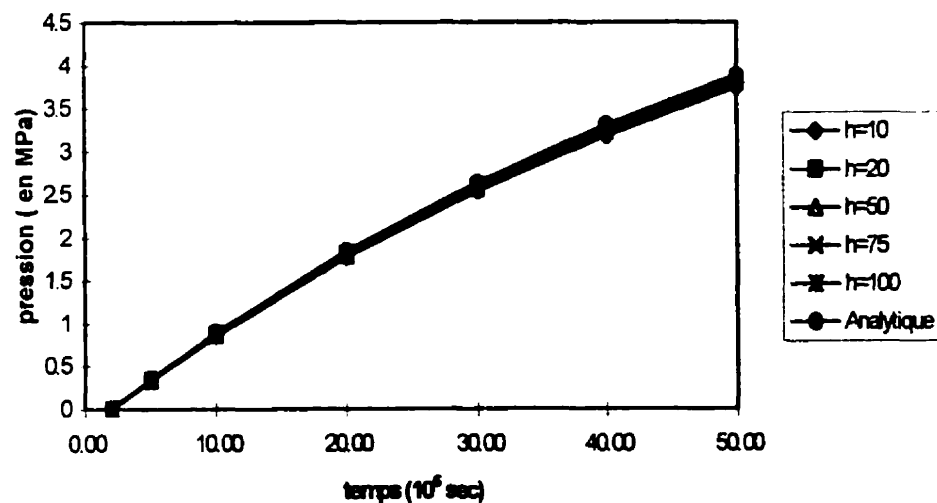


Figure 4.12 Historique de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence du nombre d'incrément de charge lors de la seconde itération.

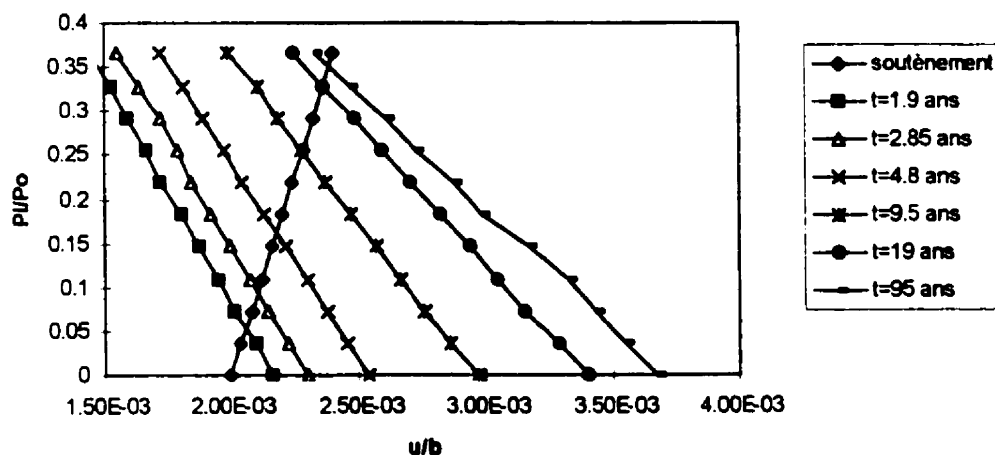


Figure 4.13 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la seconde itération

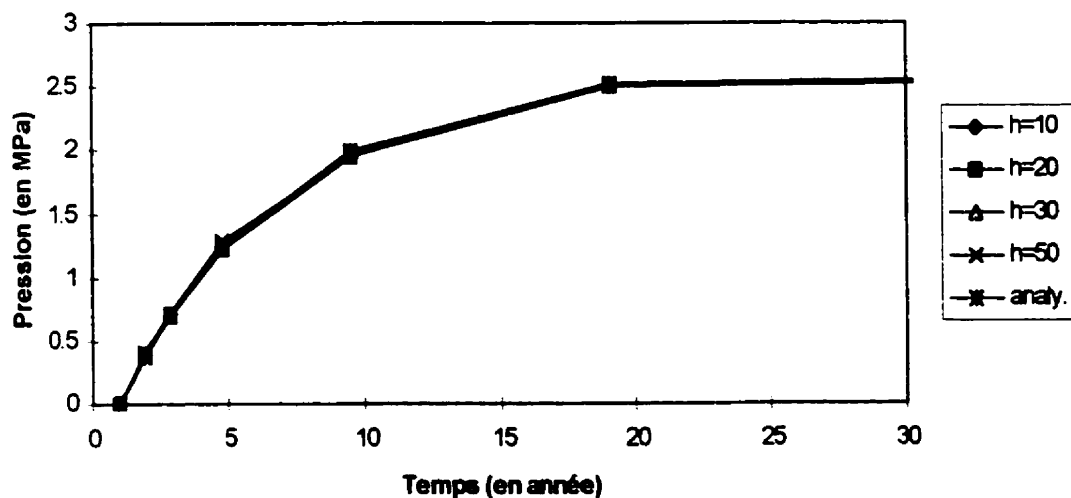


Figure 4.14 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence du nombre d'incrément de charge lors de la seconde itération.

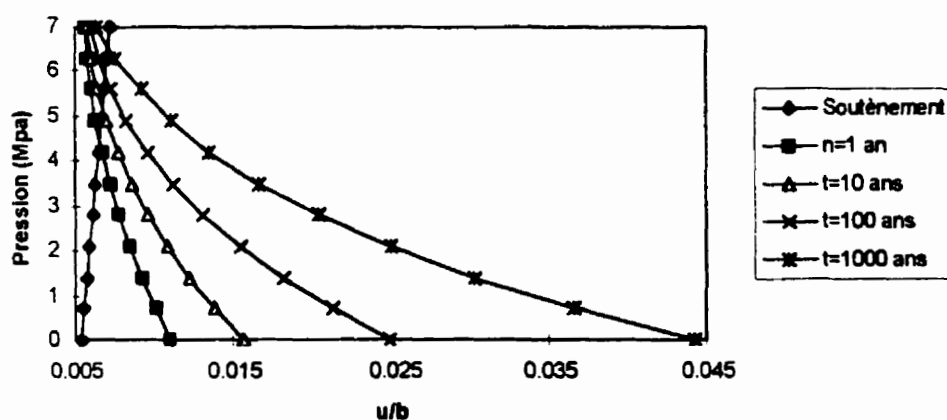


Figure 4.15 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de puissance avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la seconde itération

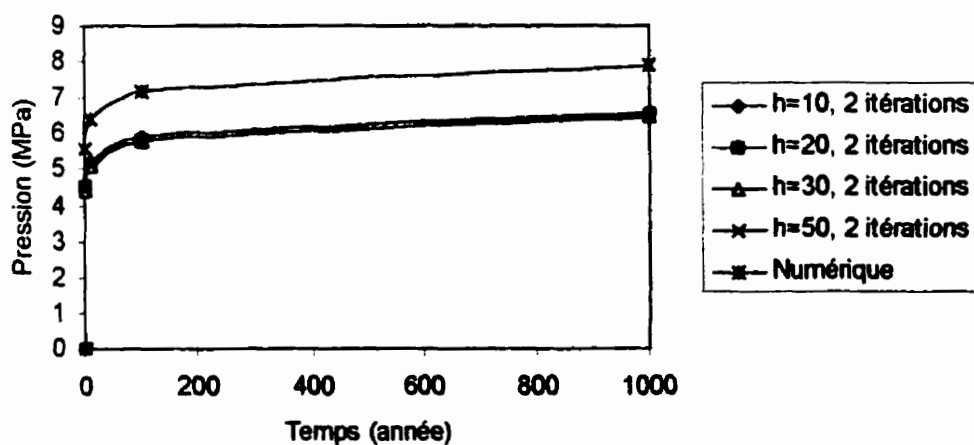


Figure 4.16 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de puissance obtenus par l'approche graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence du nombre d'incrément de charge lors de la seconde itération

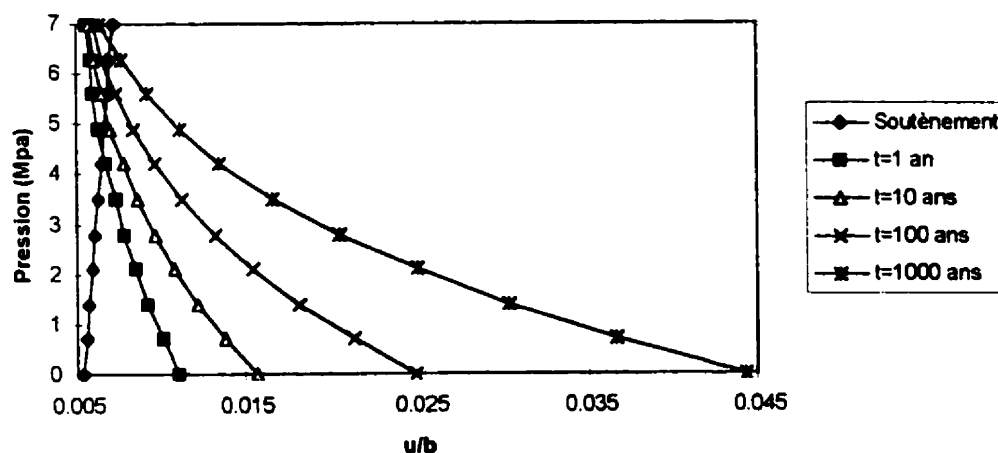


Figure 4.17 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de puissance avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la troisième itération

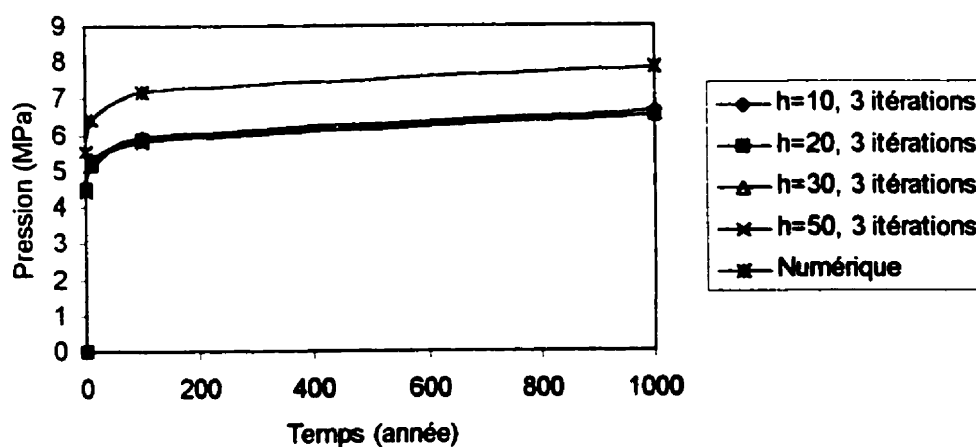


Figure 4.18 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence du nombre d'incrément de charge lors de la troisième itération

Tableau 4.6 Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence du nombre de pas lors de la seconde itération

Temps (sec)	Pression										
	h=10		h=20		h=50		h=75		h=100		anal. (MPa)
	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	
2.E+06	0		0		0		0		0		0
5.E+06	0.34	-1.90	0.34	-1.60	0.34	-1.70	0.35	-0.33	0.35	-0.32	0.35
1.E+07	0.87	-2.20	0.87	-1.86	0.87	-1.71	0.88	-0.76	0.88	-0.59	0.89
2.E+07	1.78	-3.06	1.79	-2.45	1.80	-2.07	1.81	-1.38	1.81	-1.20	1.83
3.E+07	2.54	-3.51	2.56	-2.65	2.58	-2.09	2.59	-1.58	2.60	-1.43	2.63
4.E+07	3.19	-3.57	3.22	-2.47	3.25	-1.78	3.26	-1.41	3.26	-1.28	3.31
5.E+07	3.74	-3.31	3.79	-2.03	3.83	-1.20	3.84	-0.96	3.84	-0.94	3.87

Tableau 4.7 Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence du nombre de pas lors de la seconde itération

Temps (année)	Pression								anal. (MPa)
	h=10		h=20		h=30		h=50		
	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	
0.95	0		0		0		0		0
1.9	0.39	3.48	0.39	1.92	0.39	3.95	0.40	5.67	0.38
2.85	0.71	1.32	0.71	1.32	0.70	-1.17	0.70	-0.24	0.70
4.8	1.23	-0.67	1.24	0.23	1.23	-0.18	1.27	3.04	1.23
9.5	1.95	-2.21	1.97	-0.91	1.95	-1.93	1.95	-1.93	1.99
19	2.50	-0.64	2.51	-0.25	2.52	0.32	2.51	-0.19	2.51
95	2.65	0.01	2.65	-0.23	2.66	0.42	2.67	0.69	2.65

Tableau 4.8 Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence du nombre de pas lors de la seconde itération

Temps (année)	Pression								num. (MPa)
	h=10		h=20		h=30		h=50		
	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4.49	-19.1	4.51	-18.9	4.42	-20.5	4.45	-19.9	5.56
10	5.22	-18.6	5.15	-19.6	5.09	-20.6	5.15	-19.7	6.41
100	5.91	-18	5.82	-19.2	5.81	-19.3	5.8	-19.4	7.2
1000	6.56	-16.7	6.49	-17.6	6.48	-17.9	6.46	-18	7.87

Tableau 4.9 Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence du nombre de pas lors de la troisième itération

Temps (année)	Pression								num. (MPa)
	h=10		h=20		h=30		h=50		
	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	mod. (MPa)	écart %	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4.53	-18.5	4.52	-18.6	4.53	-18.4	4.47	-19.6	5.56
10	5.25	-18	5.18	-19.2	5.32	-17	5.2	-18.8	6.41
100	5.94	-17.4	5.86	-18.6	5.85	-18.8	5.84	-18.9	7.2
1000	6.63	-15.8	6.54	-17	6.51	-17.3	6.51	-17.3	7.87

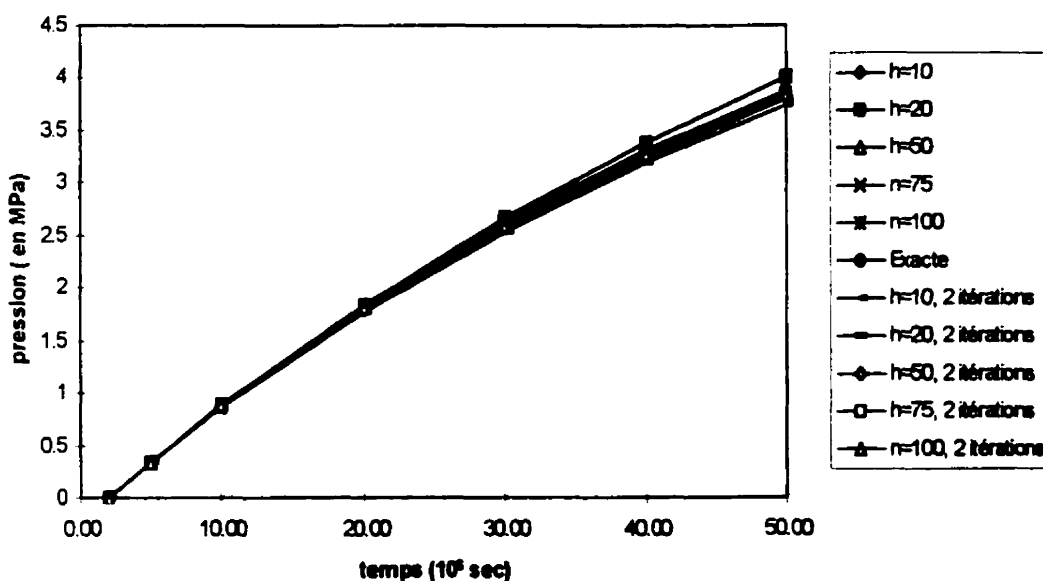


Figure 4.19 Historiques de chargement du soutènement obtenus pour la loi de comportement de Maxwell avec les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique pour faire la comparaison entre la première et la seconde itération

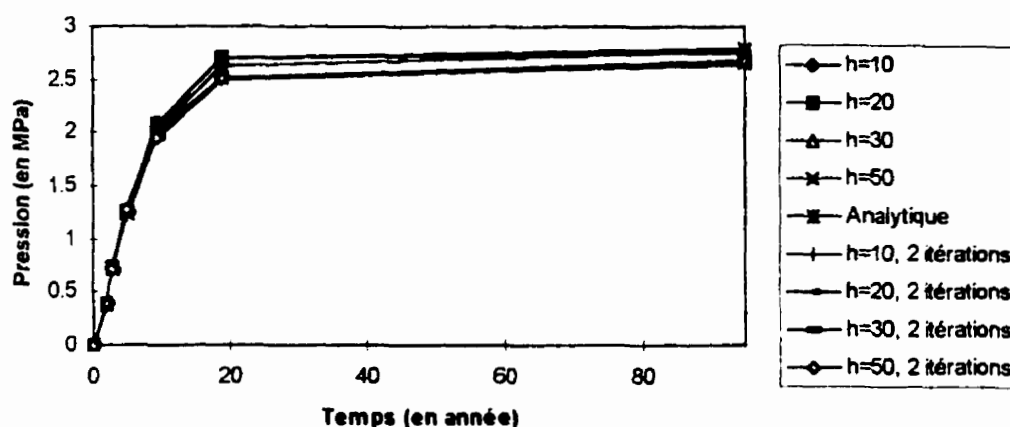


Figure 4.20 Historiques de chargement du soutènement obtenus pour la loi de comportement de Zener avec les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique pour faire la comparaison entre la première et la seconde itération

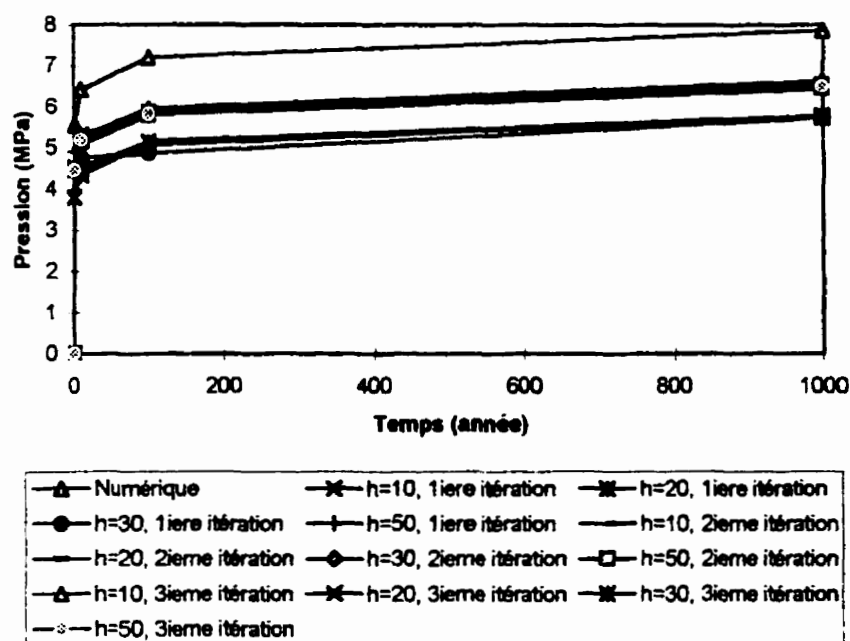


Figure 4.21 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique pour faire la comparaison entre la première, seconde et troisième itération

4.2.4 Procédure adoptée

Les résultats présentés aux sections 4.2.1 à 4.2.3 montrent que, pour les modèles de Maxwell et Zener une première itération comportant 10 pas génère des résultats qui s'approchent suffisamment de ceux obtenus avec les modèles analytiques pour être jugée acceptable.

Pour ce qui a trait à la loi de puissance, les tableaux 4.8 à 4.9 montrent que les itérations subséquentes améliorent les résultats mais les écarts entre l'approche numérique et l'approche graphique convergence-confinement modifiée demeurent non négligeables. Bien que l'amélioration soit notable mais tout de même faible par rapport aux écarts, le temps et l'effort que nécessite une seconde ou une troisième itération sont tellement importants que nous avons décidé de nous en tenir à une seule itération pour la loi de comportement loi de puissance.

4.3 Cas étudiés

On se rappelle que dans ce qui suit, les résultats obtenus avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée impliquent une seule itération comportant dix pas de calcul.

4.3.1 Loi de comportement de Maxwell linéaire

4.3.1.1 Influence de la rigidité du soutènement

Les résultats pour les approches graphiques convergence-confinement conventionnelle et modifiée sont illustrés par les graphiques 4.22 et 4.23. Pour faciliter l'analyse, les résultats sont regroupés sous forme de tableau (voir tableaux 4.10 et 4.11.).

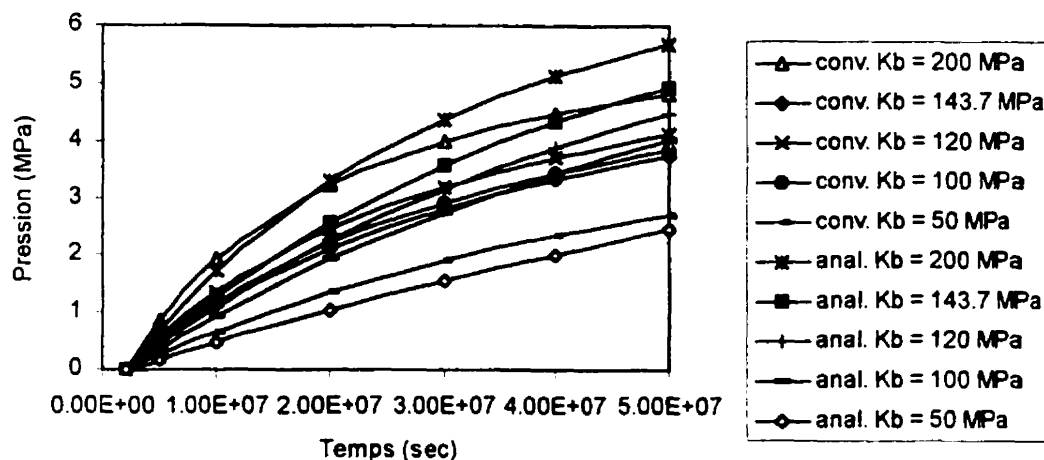


Figure 4.22 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement

Tableau 4.10 Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement

Temps (sec)	Pression														
	$K_b = 200 \text{ MPa}$			$K_b = 143.7 \text{ MPa}$			$K_b = 120 \text{ MPa}$			$K_b = 100 \text{ MPa}$			$K_b = 50 \text{ MPa}$		
	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
2.E+06	0		0	0		0	0		0	0		0	0		0
5.E+06	0.88	25	0.71	0.48	-8.01	0.52	0.59	34.2	0.44	0.5	38.9	0.37	0.27	44.1	0.19
1.E+07	1.94	12.4	1.72	1.14	-12.1	1.3	1.37	24	1.1	1.19	27.8	0.94	0.67	38.4	0.49
2.E+07	3.23	-1.81	3.29	2.13	-17.6	2.58	2.47	10.2	2.24	2.21	14.5	1.93	1.35	29	1.05
3.E+07	3.98	-8.98	4.38	2.82	-20.9	3.57	3.2	1.62	3.15	2.92	5.82	2.76	1.9	21.8	1.58
4.E+07	4.48	-12.8	5.14	3.34	-22.8	4.33	3.73	-4.05	3.89	3.44	-0.2	3.45	2.34	15.8	2.03
5.E+07	4.84	-14.7	5.67	3.74	-23.9	4.92	4.12	-7.88	4.48	3.84	-4.49	4.02	2.72	10.8	2.45

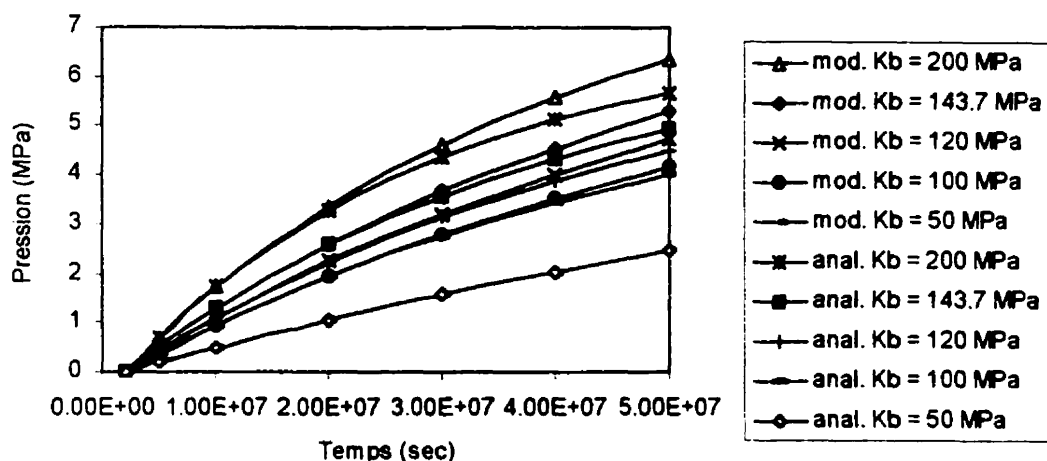


Figure 4.23 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement

Tableau 4.11 Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement

Temps (sec)	Pression														
	K _b = 200 MPa			K _b = 143.7 MPa			K _b = 120 MPa			K _b = 100 MPa			K _b = 50 MPa		
	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
2.E+06	0		0	0		0			0			0			0
5.E+06	0.7	-0.5	0.71	0.52	-0.56	0.52	0.43	-0.58	0.44	0.36	-0.62	0.37	0.19	-0.65	0.19
1.E+07	1.72	0.01	1.72	1.29	-0.29	1.3	1.1	-0.38	1.1	0.93	-0.47	0.94	0.48	-0.61	0.49
2.E+07	3.36	2.12	3.29	2.6	0.95	2.58	2.25	0.53	2.24	1.93	0.21	1.93	1.04	-0.39	1.05
3.E+07	4.6	5.07	4.38	3.67	2.72	3.57	3.21	1.84	3.15	2.79	1.18	2.76	1.56	-0.11	1.56
4.E+07	5.58	8.54	5.14	4.54	4.9	4.33	4.02	3.51	3.89	3.53	2.42	3.45	2.03	0.27	2.03
5.E+07	6.37	12.3	5.67	5.28	7.36	4.92	4.72	5.41	4.48	4.18	3.87	4.02	2.47	0.73	2.45

4.3.1.2 Influence des paramètres de fluage

L'illustration de l'influence des paramètres de fluage est présentée aux figures 4.24 et 4.25. Les tableaux 4.12 et 4.13 font la synthèse des résultats.

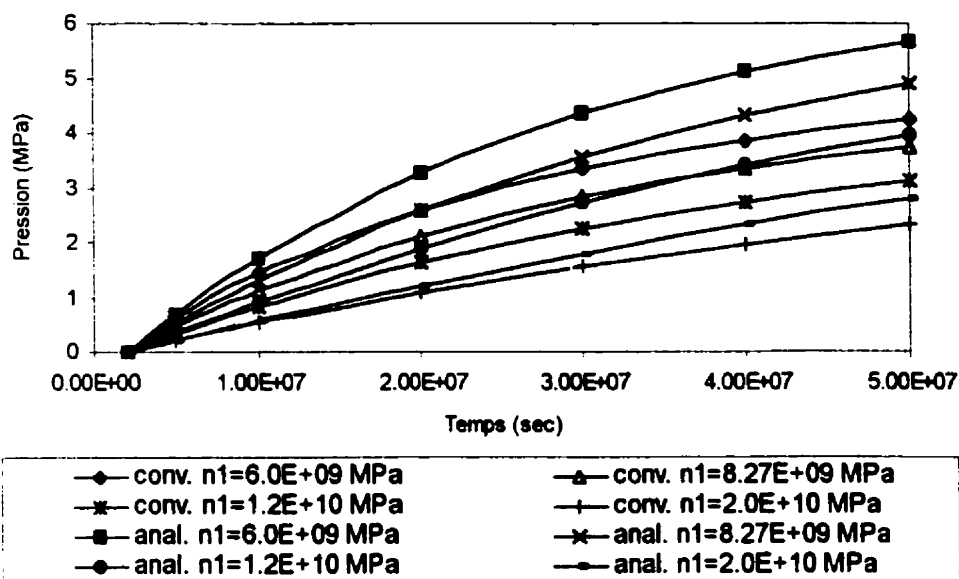


Figure 4.24 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage

Tableau 4.12 Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage

Temps (sec)	Pression											
	$\eta_1=6.0 \times 10^9 \text{ kPa} \cdot \text{sec}$			$\eta_1=8.27 \times 10^9 \text{ kPa} \cdot \text{sec}$			$\eta_1=1.2 \times 10^{10} \text{ kPa} \cdot \text{sec}$			$\eta_1=2.0 \times 10^{10} \text{ kPa} \cdot \text{sec}$		
	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
2.E+06	0		0	0		0	0		0	0		0
5.E+06	0.63	-10.1	0.7	0.48	-8.01	0.52	0.34	-5.19	0.36	0.21	-3.03	0.22
1.E+07	1.46	-15.2	1.72	1.14	-12.1	1.3	0.84	-8.78	0.92	0.54	-5.55	0.57
2.E+07	2.6	-20.9	3.28	2.13	-17.6	2.58	1.64	-13.6	1.9	1.1	-9.4	1.21
3.E+07	3.34	-23.6	4.37	2.82	-20.9	3.57	2.25	-17.2	2.72	1.57	-12.4	1.79
4.E+07	3.86	-24.7	5.13	3.34	-22.8	4.33	2.74	-19.7	3.41	1.97	-14.8	2.31
5.E+07	4.25	-24.9	5.67	3.74	-23.9	4.92	3.13	-21.3	3.98	2.32	-16.7	2.78

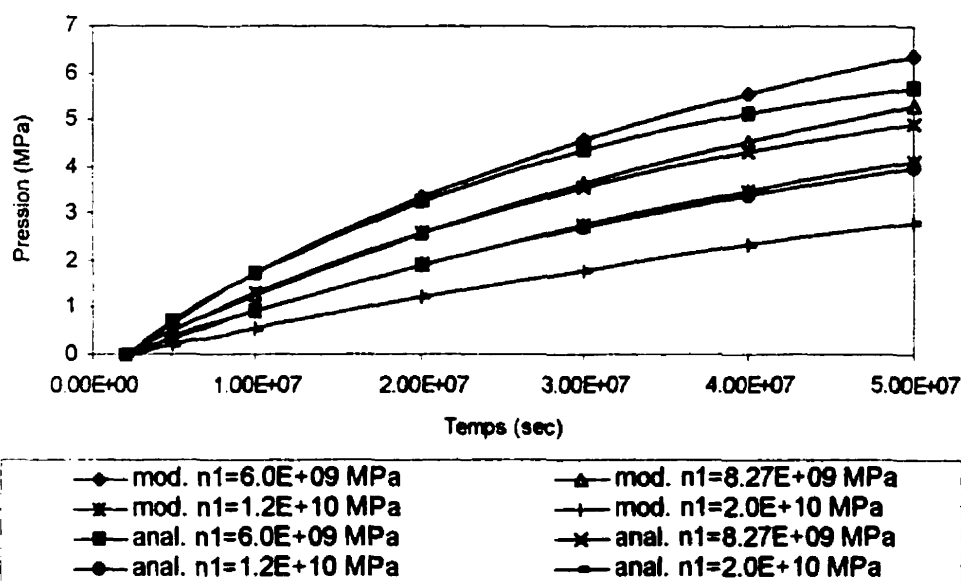


Figure 4.25 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage

Tableau 4.13 Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage

Temps (sec)	Pression											
	$\eta_1=6.0 \times 10^9 \text{ kPa} \cdot \text{sec}$			$\eta_1=8.27 \times 10^9 \text{ kPa} \cdot \text{sec}$			$\eta_1=1.2 \times 10^{10} \text{ kPa} \cdot \text{sec}$			$\eta_1=2.0 \times 10^{10} \text{ kPa} \cdot \text{sec}$		
	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
2.E+06	0		0	0		0	0		0	0		0
5.E+06	0.7	-0.55	0.7	0.52	-0.56	0.52	0.33	-9.73	0.36	0.22	-0.97	0.22
1.E+07	1.72	0.03	1.72	1.29	-0.29	1.3	0.92	-0.46	0.92	0.57	-0.65	0.57
2.E+07	3.35	2.09	3.28	2.6	0.95	2.58	1.91	0.17	1.9	1.21	-0.34	1.21
3.E+07	4.59	5.05	4.37	3.67	2.72	3.57	2.75	1.13	2.72	1.8	0.07	1.79
4.E+07	5.57	8.51	5.13	4.54	4.9	4.33	3.49	2.36	3.41	2.33	0.59	2.31
5.E+07	6.36	12.3	5.67	5.28	7.36	4.92	4.13	3.79	3.98	2.82	1.25	2.78

4.3.1.3 Comparaison entre les approches numérique et analytique

Nous avons illustré la comparaison entre les approches numérique et analytique, pour les deux études effectuées, aux figures 4.26 et 4.27. Les résultats sont regroupés dans les tableaux 4.14 et 4.15.

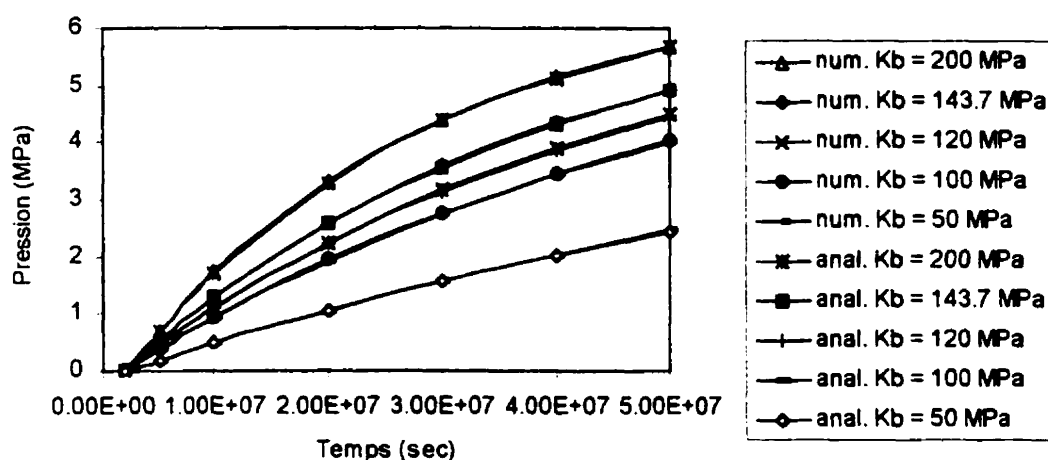


Figure 4.26 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches numérique et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement

Tableau 4.14 Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche numérique comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement

Temps (sec)	Pression														
	$K_b = 200 \text{ MPa}$			$K_b = 143.7 \text{ MPa}$			$K_b = 120 \text{ MPa}$			$K_b = 100 \text{ MPa}$			$K_b = 50 \text{ MPa}$		
	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
2.E+06	0		0	0		0	0		0	0		0	0		0
5.E+06	0.71	0.72	0.71	0.52	0.81	0.52	0.44	0.94	0.44	0.37	1.04	0.37	0.19	1.65	0.19
1.E+07	1.73	0.52	1.72	1.3	0.59	1.3	1.11	0.62	1.1	0.94	0.67	0.94	0.49	0.91	0.49
2.E+07	3.3	0.36	3.29	2.59	0.43	2.58	2.25	0.46	2.24	1.94	0.48	1.93	1.06	0.62	1.05
3.E+07	4.39	0.29	4.38	3.58	0.34	3.57	3.16	0.37	3.15	2.77	0.42	2.76	1.57	0.53	1.56
4.E+07	5.15	0.22	5.14	4.34	0.29	4.33	3.9	0.31	3.89	3.46	0.35	3.45	2.04	0.47	2.03
5.E+07	5.68	0.15	5.67	4.93	0.25	4.92	4.49	0.29	4.48	4.03	0.31	4.02	2.47	0.46	2.45

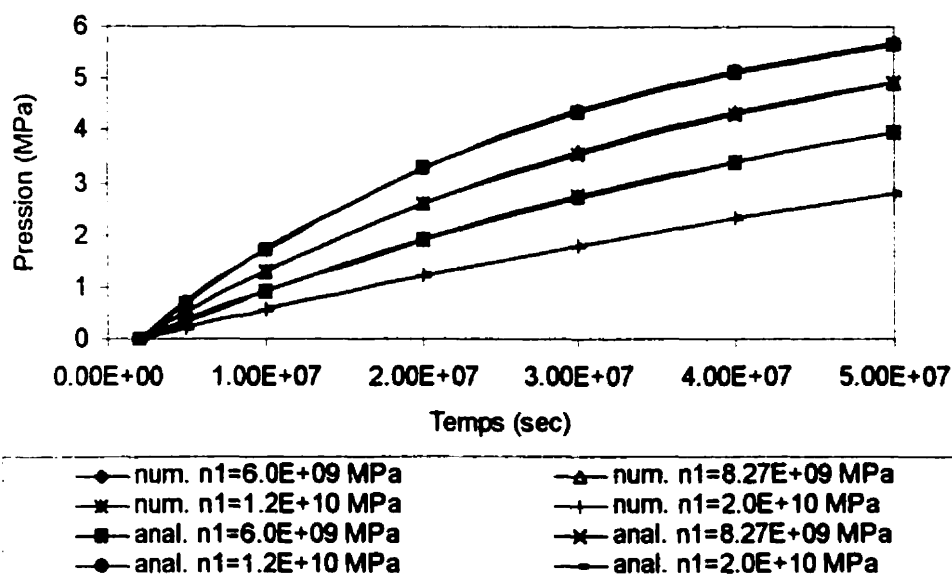


Figure 4.27 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Maxwell obtenus par les approches numérique et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage

Tableau 4.15 Résultats pour la loi de comportement de Maxwell avec l'approche numérique comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage

Temps (sec)	Pression											
	$\eta_1=6.0 \times 10^9 \text{ kPa} \cdot \text{sec}$			$\eta_1=8.27 \times 10^9 \text{ kPa} \cdot \text{sec}$			$\eta_1=1.2 \times 10^{10} \text{ kPa} \cdot \text{sec}$			$\eta_1=2.0 \times 10^{10} \text{ kPa} \cdot \text{sec}$		
	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
2.E+06	0		0	0		0	0		0	0		0
5.E+06	0.71	0.79	0.7	0.52	0.81	0.52	0.36	1	0.36	0.22	1.42	0.22
1.E+07	1.73	0.57	1.72	1.3	0.59	1.3	0.93	0.62	0.92	0.57	0.78	0.57
2.E+07	3.29	0.4	3.28	2.59	0.43	2.58	1.91	0.43	1.9	1.22	0.52	1.21
3.E+07	4.39	0.32	4.37	3.58	0.34	3.57	2.73	0.36	2.72	1.8	0.41	1.79
4.E+07	5.15	0.26	5.13	4.34	0.29	4.33	3.42	0.3	3.41	2.32	0.37	2.31
5.E+07	5.68	0.18	5.67	4.93	0.25	4.92	3.99	0.25	3.98	2.79	0.32	2.78

4.3.2 Loi de comportement de Zener

4.3.2.1 Influence de la rigidité du soutènement

Les figures 4.28 et 4.29 illustrent l'influence de la rigidité du soutènement. Les détails de ces résultats sont regroupés aux tableaux 4.16 et 4.17.

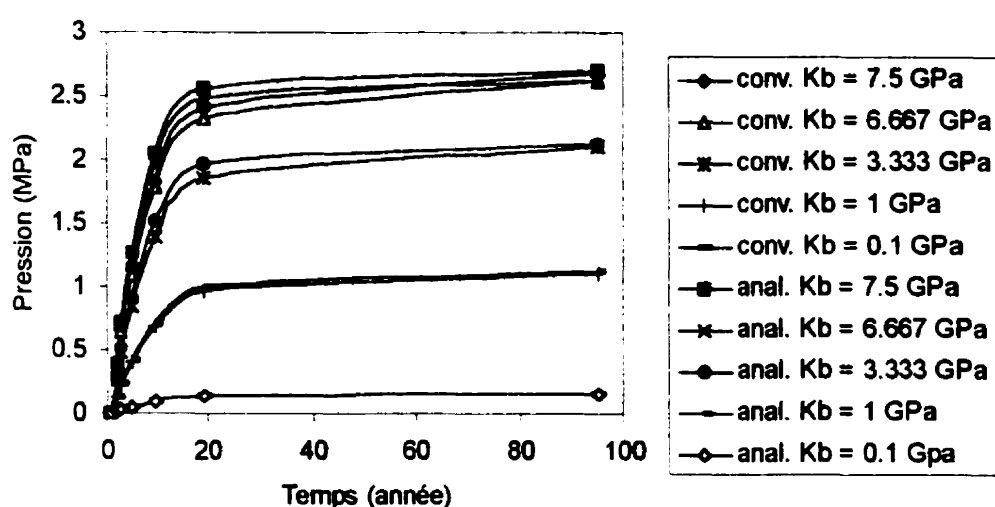


Figure 4.28 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement

Tableau 4.16 Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement

Temps (année)	Pression														
	$K_b = 7.5$ GPa			$K_b = 6.667$ GPa			$K_b = 3.333$ GPa			$K_b = 1.0$ GPa			$K_b = 0.1$ GPa		
	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
0.95	0		0	0		0	0		0	0		0	0		0
1.9	0.36	-7.3	0.39	0.35	-7.02	0.37	0.26	-5.22	0.27	0.12	-2.38	0.12	0.01	-0.3	0.01
2.85	0.66	-8.57	0.73	0.64	-8.26	0.7	0.48	-6.22	0.51	0.22	-2.89	0.23	0.03	-0.37	0.03
4.8	1.14	-10.1	1.27	1.1	-9.73	1.22	0.84	-7.49	0.91	0.4	-3.61	0.41	0.05	-0.47	0.05
9.5	1.83	-10.3	2.04	1.77	-9.99	1.97	1.39	-8.03	1.51	0.69	-4.15	0.72	0.09	-0.57	0.09
19	2.4	-6.44	2.56	2.33	-6.33	2.49	1.86	-5.46	1.97	0.96	-3.15	0.99	0.13	-0.47	0.13
95	2.69	-0.45	2.7	2.62	-0.48	2.63	2.12	-0.53	2.13	1.12	-0.63	1.12	0.16	-0.72	0.16

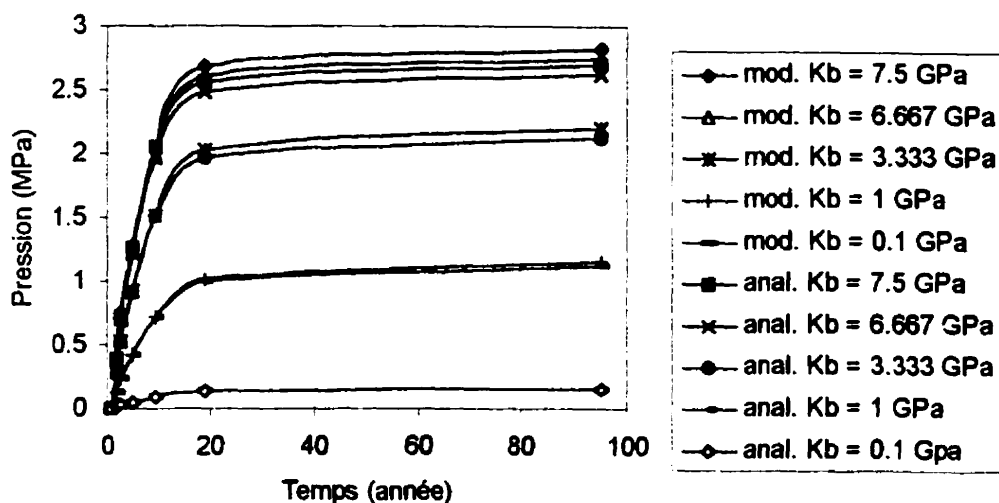


Figure 4.29 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement

Tableau 4.17 Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement

Temps (année)	Pression														
	$K_b = 7.5 \text{ GPa}$			$K_b = 6.667 \text{ GPa}$			$K_b = 3.333 \text{ GPa}$			$K_b = 1.0 \text{ GPa}$			$K_b = 0.1 \text{ GPa}$		
	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
0.95	0		0	0		0	0		0	0		0	0		0
1.9	0.39	1.01	0.39	0.38	0.33	0.37	0.28	1.06	0.27	0.12	0.8	0.12	0.01	0.06	0.01
2.85	0.74	2.41	0.73	0.71	2.39	0.7	0.52	2.61	0.51	0.23	2.46	0.23	0.03	2.37	0.03
4.8	1.28	0.92	1.27	1.23	1.04	1.22	0.91	0.63	0.91	0.41	0.08	0.41	0.05	-0.06	0.05
9.5	2.05	0.55	2.04	1.98	0.39	1.97	1.51	0.23	1.51	0.72	0.15	0.72	0.09	0.45	0.09
19	2.69	4.82	2.56	2.6	4.55	2.49	2.04	3.34	1.97	1.01	1.58	0.99	0.14	0.79	0.13
95	2.83	4.7	2.7	2.75	4.56	2.63	2.21	3.81	2.13	1.15	2.37	1.12	0.16	1.02	0.16

4.3.2.2 Influence des paramètres de fluage

L'influence des paramètres de fluage, sur la loi de comportement de Zener, est illustrée sur la figure 4.30, pour l'approche convergence-confinement conventionnelle et sur la figure 4.31, pour l'approche convergence-confinement modifiée. Les tableaux 4.18 et 4.19 regroupent les résultats pour chacune des approches graphiques.

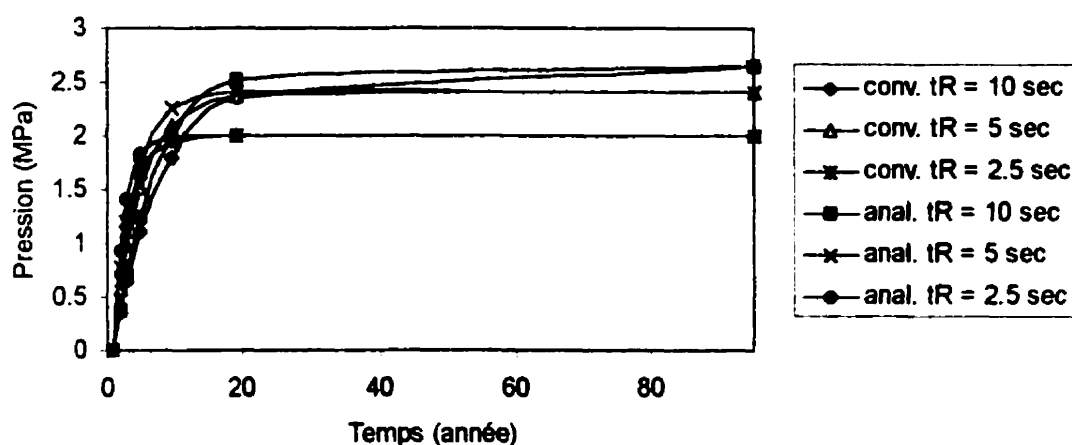


Figure 4.30 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage

Tableau 4.18 Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage

Temps (sec)	Pression								
	$t_R = 10 \text{ sec}$			$t_R = 5 \text{ sec}$			$t_R = 2.5 \text{ sec}$		
	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	conv. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
0.95	0		0	0		0	0		0
1.9	0.35	-7.10	0.38	0.57	-11.6	0.64	0.77	-16.3	0.92
2.85	0.65	-8.35	0.70	0.97	-12.3	1.11	1.21	-14.4	1.42
4.8	1.11	-9.83	1.23	1.52	-11.8	1.72	1.66	-9.32	1.83
9.5	1.79	-10.1	1.99	2.10	-7.3	2.26	1.95	-2.1	1.99
19	2.35	-6.36	2.51	2.37	-1.58	2.41	1.99	-0.05	2.00
95	2.64	-0.48	2.65	2.41	0.00	2.41	2.00	0.00	2.00

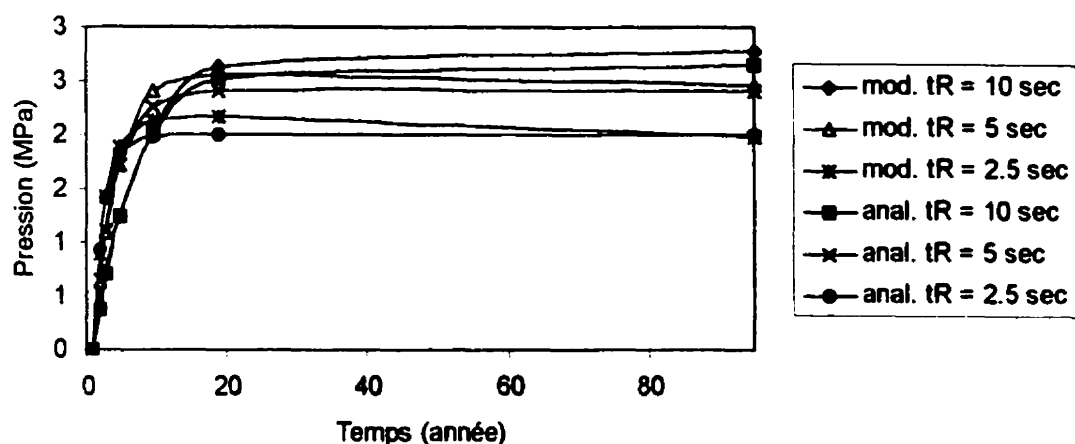


Figure 4.31 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage

Tableau 4.19 Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage

Temps (sec)	Pression								
	$t_R = 10$ sec			$t_R = 5$ sec			$t_R = 2.5$ sec		
	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
0.95	0		0	0		0	0		0
1.9	0.38	1.00	0.38	0.64	-0.81	0.64	0.88	-4.29	0.92
2.85	0.72	2.74	0.70	1.10	-1.20	1.11	1.42	0.66	1.42
4.8	1.25	1.06	1.23	1.72	0.10	1.72	1.88	2.83	1.83
9.5	2.00	0.5	1.99	2.40	6.1	2.26	2.13	7.1	1.99
19	2.62	4.47	2.51	2.55	6.17	2.41	2.17	8.67	2.00
95	2.78	4.59	2.65	2.46	1.76	2.41	1.97	-1.10	2.00

4.3.2.3 Comparaison entre les approches numérique et analytique

Pour comparer les résultats entre l'approche numérique et l'approche analytique, nous avons utilisé les historiques de chargement 4.32 et 4.33. Les tableaux 4.20 et 4.21 synthétisent les résultats obtenus.

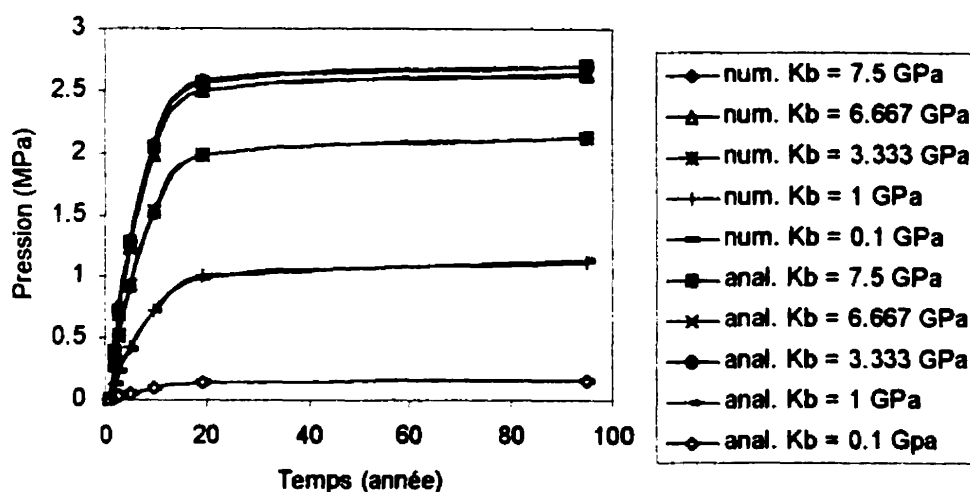


Figure 4.32 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches numérique et analytique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement

Tableau 4.20 Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche numérique comparée à l'approche analytique. Influence de la rigidité du soutènement

Temps (année)	Pression														
	$K_b = 7.5 \text{ GPa}$			$K_b = 6.667 \text{ GPa}$			$K_b = 3.333 \text{ GPa}$			$K_b = 1.0 \text{ GPa}$			$K_b = 0.1 \text{ GPa}$		
	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
0.95	0		0	0		0	0		0	0		0	0		0
1.9	0.41	5.18	0.39	0.39	4.35	0.37	0.29	4.97	0.27	0.13	8.07	0.12	0.02	13.8	0.01
2.85	0.75	3.07	0.73	0.72	3.13	0.7	0.53	2.69	0.51	0.23	2.6	0.23	0.03	7.6	0.03
4.8	1.29	1.46	1.27	1.24	1.45	1.22	0.92	1.32	0.91	0.42	1.97	0.41	0.05	4.06	0.05
9.5	2.05	0.65	2.04	1.98	0.6	1.97	1.52	0.75	1.51	0.73	0.93	0.72	0.09	2.24	0.09
19	2.57	0.16	2.56	2.49	0.12	2.49	1.98	0.24	1.97	1	0.39	0.99	0.14	1.22	0.13
95	2.7	-0.22	2.7	2.62	-0.32	2.63	2.12	-0.34	2.13	1.12	-0.09	1.12	0.16	0.73	0.16

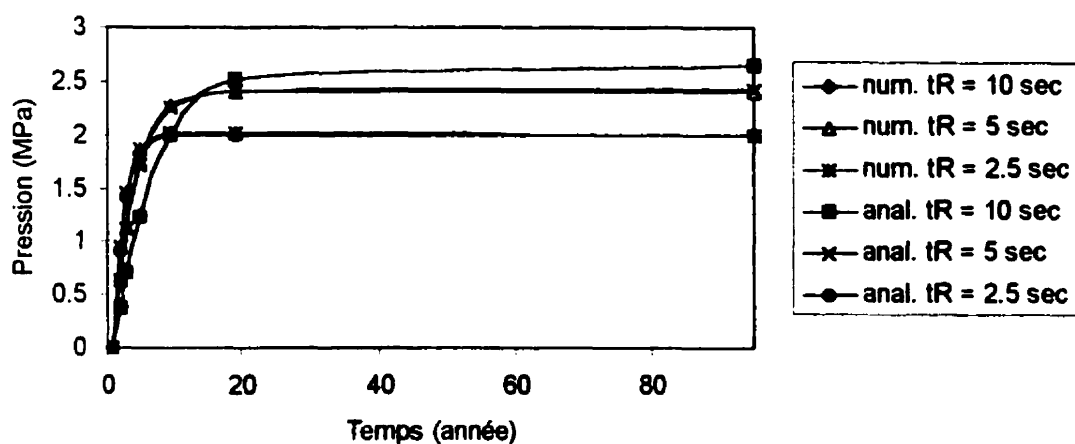


Figure 4.33 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement de Zener obtenus par les approches numérique et analytique illustrant l'influence des paramètres de fluage

Tableau 4.21 Résultats pour la loi de comportement de Zener avec l'approche numérique comparée à l'approche analytique. Influence des paramètres de fluage

Temps (sec)	Pression								
	$t_R = 10 \text{ sec}$			$t_R = 5 \text{ sec}$			$t_R = 2.5 \text{ sec}$		
	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)	num. (MPa)	écart %	anal. (MPa)
0.95	0		0	0		0	0		0
1.9	0.40	4.55	0.38	0.66	3.32	0.64	0.95	3.07	0.92
2.85	0.73	3.20	0.7	1.14	2.44	1.11	1.45	2.37	1.42
4.8	1.25	1.53	1.23	1.74	1.21	1.72	1.86	1.42	1.83
9.5	2.00	0.6	1.99	2.28	0.6	2.26	2.01	0.9	1.99
19	2.52	0.16	2.51	2.41	0.16	2.41	2.01	0.75	2.00
95	2.65	-0.28	2.65	2.41	-0.01	2.41	2.00	0.35	2.00

4.3.3 Loi de comportement loi de puissance

4.3.3.1 Influence de la rigidité du soutènement

L'historique de chargement, figure 4.34, illustre l'influence de la rigidité du soutènement sur l'approche convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Les résultats sont explicités au tableau 4.22.

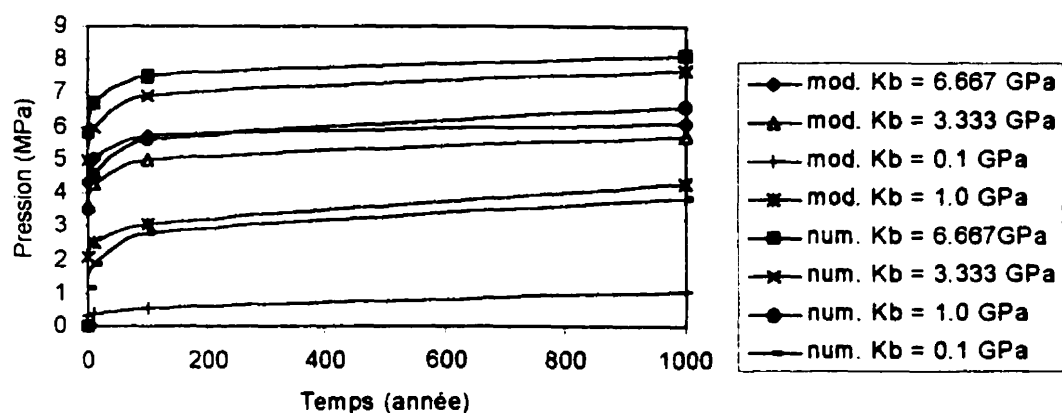


Figure 4.34 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement

Tableau 4.22 Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence de la rigidité du soutènement

Temps (année)	Pression											
	$K_b = 6.667 \text{ GPa}$			$K_b = 3.333 \text{ GPa}$			$K_b = 1.0 \text{ GPa}$			$K_b = 0.1 \text{ GPa}$		
	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)
0	0		0	0		0	0		0	0		0
1	4.34	-25.2	5.8	3.63	-27.1	4.99	2.07	-40.7	3.49	0.32	-72.5	1.15
10	5.05	-24.8	6.72	4.3	-28.1	5.98	2.54	-44	4.53	0.41	-78.3	1.86
100	5.72	-23.8	7.51	4.97	-27.9	6.9	3.09	-44.9	5.6	0.52	-81.1	2.78
1000	6.12	-24.9	8.15	5.68	-25.8	7.66	4.27	-35.1	6.58	1.02	-73.6	3.85

4.3.3.2 Influence des paramètres de fluage

Nous avons étudié l'influence de deux paramètres de fluage pour la loi de comportement loi de puissance : n et w . L'historique de chargement, la figure 4.35, et le tableau 4.23 illustrent l'influence de n , tandis que la figure 4.36 et le tableau 4.24 démontrent celle de w .

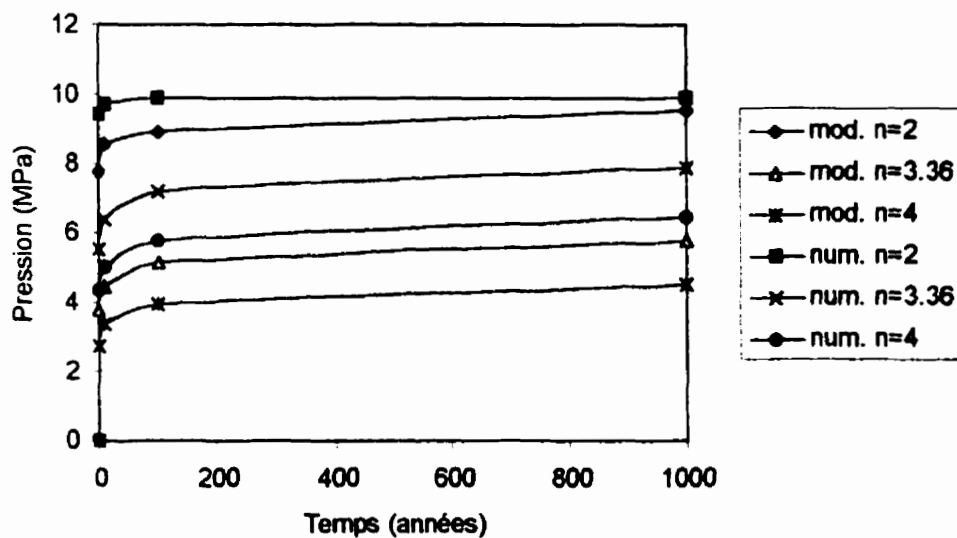


Figure 4.35 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence de n , un des paramètres de fluage

Tableau 4.23 Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence n , un des paramètres de fluage

Temps (année)	Pression								
	n=2			n=3.36			n=4		
	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	7.78	-17.4	9.42	3.8	-31.7	5.56	2.74	-36.8	4.33
10	8.57	-12	9.74	4.47	-30.2	6.41	3.4	-32.3	5.02
100	8.91	-9.66	9.87	5.15	-28.5	7.2	3.92	-31.8	5.75
1000	9.53	-3.81	9.91	5.79	-28.4	7.87	4.53	-30.1	6.47

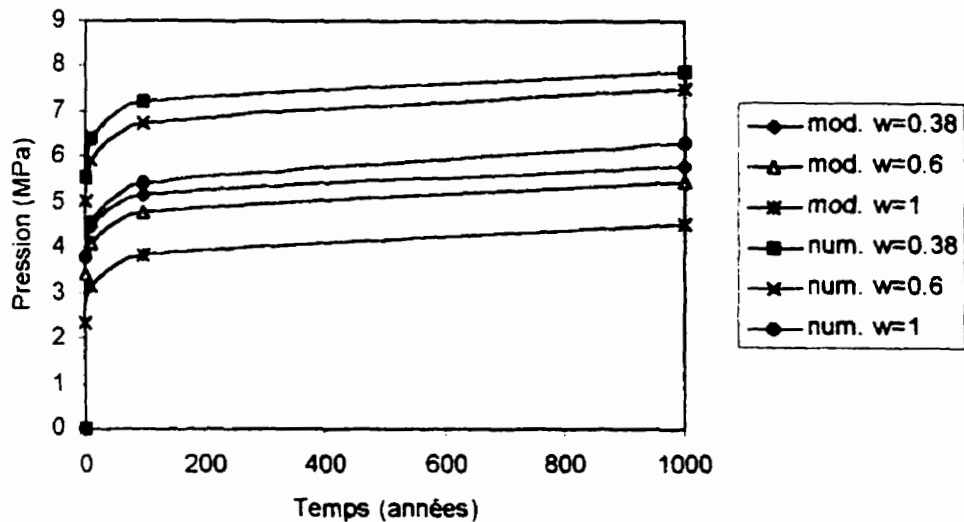


Figure 4.36 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence de w , un des paramètres de fluage

Tableau 4.24 Résultats pour la loi de comportement loi de puissance avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique. Influence de w , un des paramètres de fluage

Temps (année)	Pression								
	w=0.38			w=0.6			w=1		
	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)	mod. (MPa)	écart %	num. (MPa)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3.8	-31.7	5.56	3.39	-32.8	5.05	2.34	-38.4	3.8
10	4.47	-30.2	6.41	4.1	-30.6	5.91	3.14	-31.1	4.57
100	5.15	-28.5	7.2	4.79	-29	6.75	3.83	-29.4	5.43
1000	5.79	-26.4	7.87	5.44	-27.5	7.5	4.52	-26.5	6.32

4.3.3.3 Comparaison entre les approches graphiques et numérique

Nous avons choisi de comparer les approches graphiques à l'approche numérique pour vraiment visualiser l'effet d'utiliser l'une ou l'autre des approches. Il est important de souligner le fait que les lignes caractéristiques, pour l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle, sont tracées à partir de l'équation 47. Donc, dans ce cas, la différence entre l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle et les autres approches dépend de deux facteurs distincts : l'effet de l'historique de chargement et l'aspect de la redistribution de contraintes. Les historiques de chargement 4.37 à 4.39 illustrent les comparaisons.

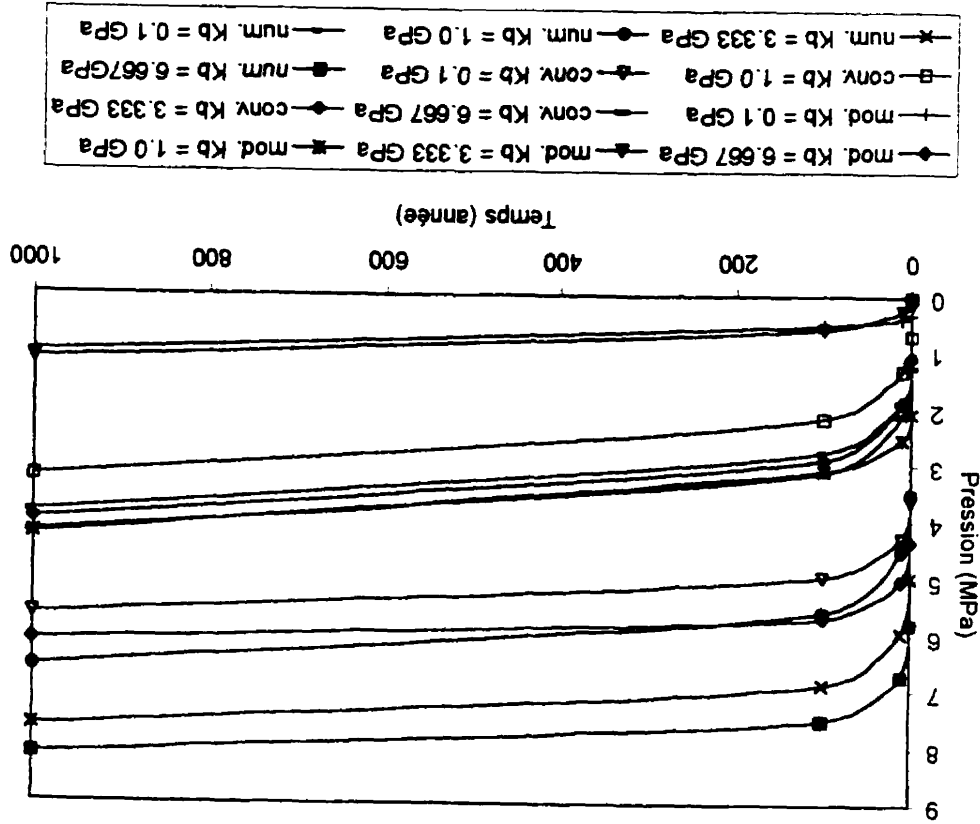


Figure 4.37 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement conventionnelle, modifiée et numérique illustrant l'influence de la rigidité du soutènement

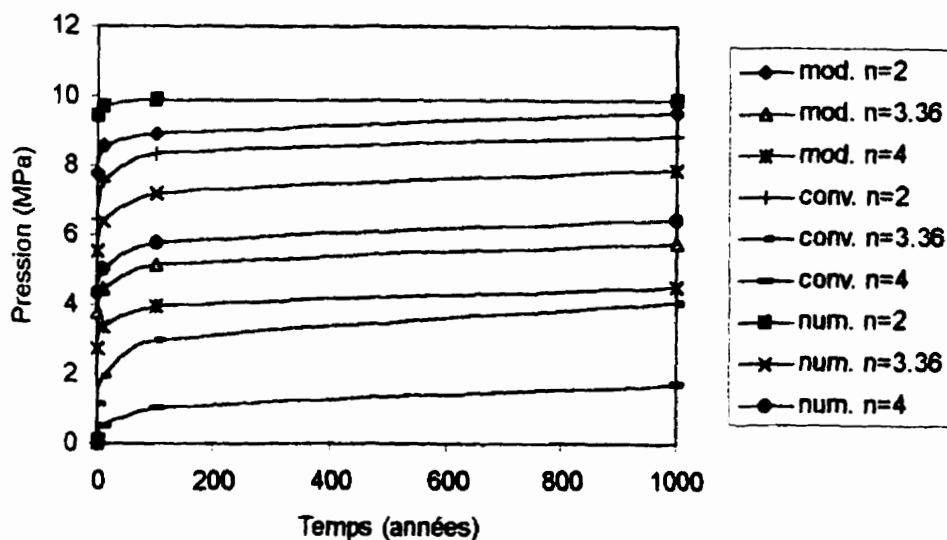


Figure 4.38 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement conventionnelle, modifiée et numérique illustrant l'influence de n , un des paramètres de fluage

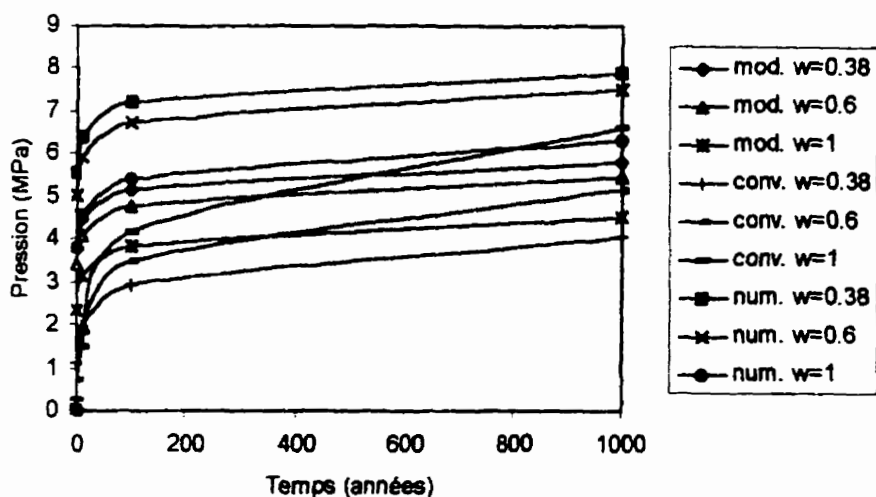


Figure 4.39 Historiques de chargement du soutènement pour la loi de comportement loi de puissance obtenus par les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique illustrant l'influence de w , un des paramètres de fluage

Nous en sommes maintenant à la dernière étape de traitement des résultats : leur analyse. Tous les résultats nécessaires à l'analyse ont été détaillés dans ce chapitre. Nous en ferons maintenant l'analyse dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Analyse des résultats

5.1 Validation des modèles numériques

5.1.1 Mise en situation

Dans un premier temps la validation des modèles numériques présentée à la section 4.1 a été basée sur les paramètres utilisés par Gill et Ladanyi (1983,1987) et Ladanyi et Gill (1984).

Afin de s'assurer que la tendance observée alors se conserve quelle que soit la rigidité du soutènement et quels que soient les lois de fluage du massif et les paramètres de ces lois, nous avons étendu cette comparaison aux cas des tableaux 3.2 à 3.4.

5.1.2 Lois de Maxwell linéaire et Zener

Les résultats présentés aux sections 4.3.1.3 (Maxwell linéaire) et 4.3.2.3 (Zener) confirment la tendance observée à la section 4.1.

Les figures 4.26 et 4.32 ainsi que les tableaux 4.14 et 4.20 montrent que la rigidité du soutènement joue un rôle important sur l'évolution dans le temps et sur la grandeur de pressions exercées par le massif sur le soutènement. Il en est de même pour les paramètres de fluage comme on peut le constater aux figures 4.27 et 4.33 ainsi qu'aux tableaux 4.15 et 4.21.

Néanmoins, l'influence de la rigidité du soutènement est faible lorsque l'on compare les écarts entre l'approche numérique et l'approche analytique. Aux tableaux 4.14 et 4.20, nous pouvons remarquer que l'écart entre les deux approches est faible pour la loi de comportement de Maxwell, inférieur à 2%, mais peut être assez important pour celle de Zener, jusqu'à 13,6%. Pour les deux lois, l'approche numérique surestime légèrement les pressions par rapport aux résultats analytiques.

Nous pouvons faire ressortir deux tendances des tableaux 4.14 et 4.20 : premièrement, l'augmentation de la rigidité du soutènement diminue l'écart entre les deux approches et deuxièmement, quelle que soit la rigidité du soutènement, l'écart diminue avec le temps.

L'explication de la première observation réside dans la nature des milieux. Lors d'une simulation numérique, il est plus complexe de modéliser des matériaux de rigidité très différente car ceci donne lieu à des grands gradients de contraintes aux interfaces.

La seconde constatation est justifiée par la méthode de calcul du logiciel. En effet, au début de la simulation, les forces non-balancées sont constamment dans leurs limites supérieures. Comme les pressions augmentent rapidement au début, l'écart observé est plus grand.

Les figures 4.27 et 4.33 illustrent le peu d'influence qu'a la variation des paramètres de fluage sur les écarts observés entre les historiques de chargement obtenus par les deux approches pour ces deux lois de comportement. Les tableaux 4.15 et 4.21 montrent que l'écart pour la loi de comportement de Maxwell est inférieur à 1.5% et pour Zener, à 5% pour la plage de valeurs analysées et la rigidité

du soutènement considérée. Dans les deux cas, l'approche numérique surestime les pressions par rapport à celles obtenues par l'approche analytique.

Au tableau 4.15, nous pouvons remarquer deux tendances : premièrement, une augmentation de η_1 augmente l'écart entre les deux approches et deuxièmement, l'écart diminue dans le temps, quelle que soit la valeur de η_1 .

La première observation s'explique par le fait que plus η_1 est grand, plus le massif est déformable. Donc, le schéma de progression dans le temps adopté dans les analyses numériques peut avoir une influence sur les résultats.

L'explication de la seconde constatation est la même que pour l'étude précédente. De plus, cette même observation est valable pour ce qui est de l'influence du temps de relaxation t_R , montrée au tableau 4.21.

Dans ce tableau, une autre tendance peut être mise en relief : une diminution de t_R augmente l'écart entre les deux approches. Le même principe de déformabilité du massif que nous avons remarqué pour la loi de comportement de Maxwell s'applique.

5.1.3 Loi de puissance

Pour la loi de puissance, les résultats présentés à la section 4.3.3.3 confirment la tendance observée à la section 4.1.

La figure 4.37 montre que la rigidité a une influence importante sur l'évolution dans le temps et sur la grandeur des pressions exercées par le massif sur le soutènement. L'influence des deux paramètres de fluage est aussi importante, comme le démontrent les figures 4.38 et 4.39.

Les écarts entre les approches analytique et numérique sont très importants pour la loi de comportement loi de puissance pour les temps courts, mais à long terme, ces écarts diminuent. L'explication de ce comportement réside dans l'aspect de l'état de fluage transitoire modélisé par FLAC alors que les équations analytiques posent comme hypothèse l'état stationnaire de fluage. A long terme, avec le modèle numérique, il y a atteinte d'un état stationnaire de fluage, donc les écarts entre les approches sont un peu plus petits.

5.2 Méthode convergence-confinement

5.2.1 Influence du nombre de pas et du nombre d'itérations pour la méthode convergence-confinement modifiée

5.2.1.1 Lois de Maxwell linéaire et Zener

Aux figures 4.5 et 4.7, nous pouvons constater que le nombre de pas n'a pas une influence marquée sur les résultats obtenus par l'approche graphique convergence-confinement modifiée lorsque comparés à ceux de l'approche analytique. En effet, dans les tableaux 4.3 et 4.4, aucune tendance ne peut être identifiée entre les différents pas d'incrément de charge. L'influence du temps au sein d'un même pas de pression est expliquée dans les paragraphes précédents.

Pour l'influence du nombre d'itérations, nous pouvons étudier deux éléments : l'effet du nombre d'incréments de charge pour la seconde itération et l'influence de procéder à une seconde itération.

Aux figures 4.12 et 4.14, nous pouvons voir que pour la seconde itération, le pas de pression n'a toujours pas d'influence marquée. Aux tableaux 4.6 et 4.7, aucune tendance n'est observable pour les mêmes temps.

Finalement, les figures 4.19 et 4.20 nous permettent de voir que pour les lois de comportement de Maxwell et de Zener, les résultats des première et seconde itérations sont pratiquement les mêmes. Dans les tableaux 4.3, 4.4, 4.6 et 4.7, nous pouvons remarquer qu'il n'y a pas de diminution de l'écart entre la première et la seconde itération.

5.2.1.2 Loi de puissance

La figure 4.9 montre que le nombre de pas n'a pas d'influence sur l'historique de chargement pour la loi de comportement loi de puissance. Au tableau 4.5, nous pouvons constater que le nombre de pas ne réduit pas l'écart entre l'approche graphique convergence-confinement modifiée et l'approche numérique.

Pour l'influence des seconde et troisième itérations, nous pouvons analyser deux éléments : l'influence du nombre de pas et l'effet des itérations supplémentaires.

Aux tableaux 4.8 et 4.9, nous pouvons constater que le nombre de pas n'a aucune influence sur l'écart entre les deux approches.

Pour ce qui est d'effectuer des itérations supplémentaires, cela a une influence. En étudiant les tableaux 4.5, 4.8 et 4.9, nous remarquons que les écarts sont un peu moins grands entre les approches pour la seconde itération que pour la première. Entre les seconde et la troisième itérations, l'influence est encore moins marquée mais toujours présente. En considérant un historique de chargement du soutènement obtenu de l'itération précédente, le nouvel historique considéré est plus près de la solution obtenue par l'approche numérique, donc l'écart diminue légèrement. La figure 4.21 illustre l'influence des itérations. Comme nous l'avons mentionné à la section 4.2.4, la diminution de l'écart d'une itération à l'autre (environ

5 %) est trop faible par rapport à l'effort déployé et au temps nécessaire pour faire des simulations supplémentaires.

5.2.2 Méthode convergence-confinement modifiée

5.2.2.1 Lois de Maxwell linéaire et Zener

5.2.2.1.1 Influence de la rigidité du soutènement

L'influence de la rigidité du soutènement est illustrée aux figures 4.23 et 4.29. Nous pouvons voir encore une fois que la rigidité a une influence sur l'approche étudiée par rapport à l'approche analytique. Les tableaux 4.11 et 4.17 nous montrent jusqu'à quel point la rigidité influence les résultats.

Nous pouvons constater un premier élément, pour les deux lois de comportement : avec le temps qui passe, la pression tend à être de plus en plus surestimée, dans le temps, pour une rigidité donnée. Cette tendance s'explique par le fait que l'historique de chargement considéré est une estimation, avec l'approche graphique convergence-confinement modifiée.

Une autre observation peut être faite pour les deux lois de comportement : plus la rigidité du soutènement augmente et plus la pression à l'interface est surestimée pour l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche analytique. Nous expliquons cette constatation par le fait que l'historique de chargement considéré est une estimation lors du calcul de la pression.

5.2.2.1.2 Influence des paramètres de fluage

Les figures 4.25 et 4.31 nous révèlent l'influence des paramètres de fluage sur l'approche graphique convergence-confinement modifiée comparée à l'approche

analytique. Les tableaux 4.13 et 4.19 nous démontrent que l'influence est relativement importante.

Pour les deux lois de comportement, nous pouvons voir que la pression est de plus en plus surestimée dans le temps pour une valeur de paramètre de fluage donnée. La tendance est expliquée de la même façon que pour l'étude précédente, à savoir, l'historique de chargement considéré est une estimation, donc surestime la pression dans le temps.

5.2.2.2 Loi de puissance

5.2.2.2.1 Influence de la rigidité du soutènement

La figure 4.34 illustre l'influence de la rigidité pour la loi de comportement loi de puissance sur l'historique de chargement. Le tableau 4.22 détaille les résultats et montre les écarts entre les approches. Pour toutes les approches, les pressions calculées par les approches graphiques sont sous-estimées.

Au tableau 4.22, nous observons que la diminution de la rigidité augmente l'écart entre l'approche graphique convergence-confinement modifiée et l'approche numérique. Cette constatation repose sur les hypothèses de travail des approches utilisées. De plus, le temps n'a pas d'influence marquée sur l'écart entre les approches. Cela s'explique par le fait que l'approche graphique convergence-confinement modifiée tient compte d'une estimation de l'historique de chargement.

5.2.2.2.2 Influence des paramètres de fluage

Le graphique de la figure 4.35 montre l'influence du paramètre n pour la loi de comportement loi de puissance sur l'historique de chargement du soutènement. Au tableau 4.23, nous pouvons constater que l'influence est très marquée. Les écarts entre les différentes approches sont très variables.

Deux constatations peuvent être faites : l'augmentation de n tend à sous-estimer les pressions et le temps diminue les écarts. La première observation peut être expliquée par le fait que plus n est grand, plus les déplacements sont grands. Donc, les variations étant plus grandes, les risques d'erreurs sont plus grands. La seconde tendance s'explique par le fait que plus le temps passe, plus l'état stationnaire de fluage est près d'être atteint.

La figure 4.36 illustre l'influence du paramètre w pour la loi de comportement loi de puissance, toujours sur l'historique de chargement. Au tableau 4.24, nous pouvons remarquer que l'influence de ce paramètre est non-négligeable. Pour w , comme pour n , les écarts entre les différentes approches sont très grands.

Deux tendances se dégagent du tableau : premièrement, le temps réduit l'écart et l'augmentation de w tend à sous-estimer la pression pour l'approche convergence-confinement modifiée comparée à l'approche numérique.

Nous remarquons également, avec les tableaux 4.23 à 4.24, que n a une plus grande influence sur l'écart que w . Nous pouvons expliquer cette observation par les équations analytiques 35 à 39 présentées au chapitre 2. Puisque n est l'exposant dans plusieurs équations, il est normal que son influence soit plus marquée.

5.2.3 Méthode convergence-confinement conventionnelle

5.2.3.1 Lois de Maxwell linéaire et Zener

5.2.3.1.1 Influence de la rigidité du soutènement

Les figures 4.22 et 4.28 illustrent l'influence très importante de la rigidité du soutènement sur le diagramme d'interaction pour les deux lois de comportement. Les

tableaux 4.10 et 4.16 montrent que les écarts entre les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et analytique sont très importants pour la loi de comportement de Maxwell, jusqu'à 44% d'écart, et un peu moins grands pour Zener, le maximum d'écart observé étant de 10.3%. Pour la loi de comportement de Zener, l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle sous-estime les pressions à l'interface massif-soutènement lorsque l'on compare avec l'approche analytique. Avec la loi de comportement de Maxwell, pour les temps courts, la pression est surestimée, mais elle est sous-estimée pour les temps longs.

Aux tableaux 4.10 et 4.16, nous pouvons remarquer que pour un temps donné, l'augmentation de la rigidité tend à sous-estimer la pression à l'interface. De plus, l'écart entre la pression calculée par l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle augmente avec l'augmentation de K_b . Nous expliquons ces tendances par le fait que l'approche convergence-confinement conventionnelle ne considère pas correctement l'interaction entre le massif et le soutènement.

5.2.3.1.2 Influence des paramètres de fluage

Les figures 4.24 et 4.30 illustrent encore une fois l'influence marquée des paramètres de fluage sur l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle par rapport à l'approche analytique. L'approche graphique convergence-confinement conventionnelle sous-estime les pressions pour les deux lois de comportement, tel que détaillé aux tableaux 4.12 et 4.18. Nous pouvons aussi remarquer que l'effet du temps est toujours aussi important que pour l'étude de la rigidité.

Aux tableaux 4.12 et 4.18, nous pouvons constater que plus le massif est déformable, moins la pression à l'interface massif-soutènement est sous-estimée. Ce

qui explique la variation de l'écart entre l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle et à l'approche graphique pour un temps donné.

5.2.3.2 Loi de puissance

Nous ne pouvons faire de comparaison directe entre l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle et l'approche numérique étant donné les hypothèses de base de chacune des approches. Donc, à la section 5.2.4, nous ferons une comparaison particulière entre les approches graphiques et l'approche numérique.

5.2.4 Comparaison entre les approches graphiques

5.2.4.1 Lois de Maxwell linéaire et Zener

Pour faire la comparaison entre les approches, pour la rigidité du soutènement, nous nous référons aux tableaux 4.10, 4.13, 4.14, 4.16, 4.17 et 4.20 pour les lois de comportement de Maxwell et Zener. L'approche graphique convergence-confinement modifiée surestime légèrement les pressions par rapport à l'approche analytique, et ce, peu importe la rigidité du soutènement. Cela nous place du côté sécuritaire lors du design d'un soutènement. Entre les approches graphiques, la méthode convergence-confinement modifiée est plus près des résultats de l'approche analytique que la méthode convergence-confinement conventionnelle.

La comparaison entre les approches, pour les paramètres de fluage, s'effectue à l'aide des tableaux 4.12, 4.13, 4.15, 4.18, 4.19 et 4.21 pour les lois de comportement de Maxwell et Zener. L'approche graphique convergence-confinement modifiée tend à surestimer légèrement les pressions calculées lorsque nous comparons les valeurs de pression avec les résultats analytiques, toutes rigidités confondues. En surestimant la pression, le design de soutènement est plus sécuritaire. De plus, pour l'étude des paramètres de fluage, les écarts sont aussi plus faibles avec

l'approche graphique convergence-confinement modifiée qu'avec l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle.

5.2.4.2 Loi de puissance

Pour un massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance, il faut se référer à la figure 4.37. Nous obtenons de meilleurs résultats pour des rigidités plus grandes en comparant l'approche graphique convergence-confinement modifiée à l'approche numérique, qu'en comparant l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle par rapport à l'approche numérique. Les écarts demeurent cependant très importants dans toutes les situations.

Pour l'étude des paramètres de fluage, nous utilisons les figures 4.38 à 4.39. Nous remarquons que les pressions sont toutes sous-estimées. De plus, nous pouvons constater que les écarts sont plus faibles entre les approches graphique convergence-confinement modifiée et numérique qu'entre les approches graphique convergence-confinement conventionnelle et numérique. Cependant, les écarts sont très importants pour les deux approches graphiques comparés aux cas de référence.

Nous vous avons présenté toutes les observations effectuées lors de l'étude des résultats obtenus par chacune des méthodes. Nous allons maintenant passer à la dernière étape de cette étude : la conclusion.

Chapitre 6

Conclusions et recommandations

En ingénierie, le fluage est un comportement important qui influence le design du soutènement qui doit supporter les charges et ce pour toute la durée de vie utile de l'ouvrage. Par durée de vie utile, nous entendons, le temps que l'ouvrage sera fonctionnel et sécuritaire pour les usagers, habituellement entre 20 et 100 ans pour les ouvrages d'art importants, beaucoup moins dans les milieux miniers.

Nous avons étudié l'influence de la rigidité du soutènement et des paramètres de fluage sur les approches numérique et graphiques en les comparant à l'approche analytique lorsque les hypothèses de base les permettaient. Pour les autres situations, les comparaisons ont été faites entre les approches ayant des hypothèses de base similaires. De plus, nous avons analysé les effets du nombre de pas de calcul et l'influence d'une seconde et même d'une troisième itération pour l'approche graphique convergence-confinement modifiée.

Le premier élément important qui ressort de cette étude est que l'évaluation de la pression par l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle est la moins bonne des approches étudiées. Le fait que les hypothèses de cette approche ne considèrent pas l'effet de l'historique de chargement influence énormément les résultats.

La meilleure approche, celle dont les résultats sont les plus près de ceux calculés analytiquement, est l'approche numérique. L'un des avantages non-négligeables de la simulation numérique est de résoudre des problèmes pour lesquels nous ne disposons pas d'une solution analytique. Le problème de cette approche de

calcul est la difficulté de s'assurer que les résultats sont valides. Pour toutes les lois de comportement, nous avons éprouvé des difficultés lors des premières utilisations. Les problèmes se sont résolus au fil de modifications et de simulations grâce aux comparaisons faites avec les résultats des solutions analytiques. Cependant, il faut toujours rester vigilant lors de l'utilisation de logiciel pour la simulation numérique, il faut rester critique face aux résultats obtenus.

L'approche graphique convergence-confinement modifiée est une approche hybride de calcul qui permet de considérer les avantages des autres approches. En effet, faire le design d'un soutènement est simple, parce que visuel, les hypothèses de calcul sont réalistes, l'historique de chargement est considéré, et finalement, nous pouvons utiliser les logiciels de simulations numériques pour faire les calculs des lignes caractéristiques du massif et ce même s'ils ne permettent pas l'installation de matériaux différents, à des temps différents... L'étude que nous avons effectuée montre que les résultats obtenus par cette approche sont meilleurs que ceux de l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle, mais moins bons que ceux de l'approche numérique.

L'étude effectuée nous a permis de constater les limites de l'approche graphique convergence-confinement conventionnelle et de faire ressortir les avantages très importants de l'approche convergence-confinement modifiée.

À la lumière des résultats étudiés, nous pouvons penser que pour des rigidités différentes ou des paramètres de fluage différents (dans les limites des lois ou méthodes étudiées), nous aurions observé les mêmes types de tendances.

En conclusion, l'approche la plus simple et la plus rapide pour faire le design du soutènement, en ayant une bonne estimation de l'historique de chargement du

soutènement, lors qu'il est impossible d'utiliser l'approche analytique, est l'approche graphique convergence-confinement modifiée. Elle permet un bon compromis entre la facilité d'obtention des résultats et la précision de ceux-ci.

D'autres éléments peuvent être étudiés concernant les différentes approches, tels que : considérer l'anisotropie du champ de contraintes préalable, utiliser des excavations autres que circulaires, faire l'étude en considérant des incréments de charge à temps constant, reprendre l'étude pour une plus vaste série de paramètres, trouver le pas minimum, faire varier le temps d'installation du soutènement et faire l'étude pour d'autres lois de fluage.

Références

BARTON, N.R. (1976), Recent Experiences with the Q-System of Tunnel Support Design, Proc. Symp. Exploitation for Rock Eng., Johannesburg, Balkema, vol. 1, pp107-117.

BARTON, N.R. (1988), Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection Using the Q-System, Rock Classification Systeme for Engineering Purposes, ASTM STP 984, Louis Kirkaldie (ed.), ASTM, Philadelphia, pp. 59-88.

BARTON, N.R., LIEN, R. et LUNDE, J. (1974), Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Supports, Rock Mech., vol. 6., pp. 189-236.

BARTON, N.R., LIEN, R. et LUNDE, J. (1975), Estimation of Support Requirements for Underground Excavations, Proc. 16th. U.S. Symp. Rock Mech., ASCE, New York, pp. 163-177.

BAZERGUI, A. et ass. (1987), Résistance des matériaux, Édition de l'école Polytechnique de Montréal, Montréal, 477 pages.

BIENIAWSKI, Z.T., (1973), Engineering Classification of Joint Rock Masses, Trans. South African Inst. Civ. Eng., vol. 15, pp. 335-344.

BIENIAWSKI, Z.T., (1974), Geomechanics Classification of Rock Masses and Its Application in Tunneling, Proc. 3d Int. Congress Rock Mech., Denver, vol. IIA, pp. 27-32.

BIENIAWSKI, Z.T., (1976), Rock Mass Classifications in Engineering, Proc. Symp. Exploitation for Rock Eng., Johannesburg, Balkema, vol. 1, pp 97-106.

BIENIAWSKI, Z.T., (1979), The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications, Proc. 4th Int. Congress Rock Mech., Montreaux, ISRM, vol. 2, pp. 41-48.

BIENIAWSKI, Z.T., (1988), The Rock Mass Rating (RMR) System (geomechanics classification) in Engineering Practice., Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984, Louis Kirkaldie (ed.), ASTM, Philadelphia, pp. 17-34.

BIENIAWSKI, Z.T., (1989), Engineering Rock Mass Classification, John wiley, New York, 251 pages.

BROWN, E.T., BRAY, J.W., LADANYI, B. and HOEK, E. (1983), Ground response curves for rock tunnels, *Journal of geotechnical Engineering*, ASCE, 109, pp. 115-139.

GILL, D.E. (1983), Notes du cours 6.602 – Mécanique des roches, École Polytechnique de Montréal, (non publiées).

GILL, D.E. and LADANYI, B. (1983), The characteristic-line concept of lining design in creeping ground, *Proc. CIM Symposium on Underground Support System*, Sudbury, Ontario,

GILL, D.E. and LADANYI, B. (1987), Time-dependent ground response curves for tunnel lining design, *Proc. 6th ISRM Cong.*, Montréal, Québec, Vol. II, pp. 917-921.

HOEK, E. and BROWN, E.T. (1980), Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining Metallurgy, 527 pages.

HULT, J.A.H. (1966), Creep in engineering structures, Blaisdell Publ., 110 pages.

KAISER, P.K. (1980), Effect of stress-history on deformation behavior of underground openings, *Underground Rock Engineering, Proc. 13th Can. Rock mech. Symp.*, Toronto, Ontario, CIM Special Volume 22, pp. 130-140.

LADANYI, B. (1974), Use of the long-term strength in the determination of ground pressure on tunnel linings, *Proc. 3rd cong. ISRM*, Denver, Vol 2, Tome 3, pp1150-1156.

LADANYI, B. (1980), Direct determination of ground pressure on tunnel lining in a non-linear viscoelastic rock, *Underground Rock Engineering, Proc. 13th Can. Rock mech. Symp.*, Toronto, Ontario, CIM Special Volume 22, pp. 126-132.

LADANYI, B. and GILL, D.E. (1984), Tunnel lining design in a creeping rock, *Design and performance of underground excavations*, ISRM/BGS, pp. 19-26.

LADANYI, B. and GILL, D.E (1988), Design of tunnel lining in a creeping rock, *International Journal of Mining and Geological Engineering*, Vol. 6, pp. 113-126.

LADANYI, B. and JOHNSTON, G.H. (1973), Evaluation of Creep Properties of Frozen Soils with the Pressuremeter, *Permafrost : The North American Contribution to the Second International Conference*, National Academy of Sciences, pp. 310-318.

LAUFFER, H. and SEEGER, G. (1961), Design and Control of Lining of Pressure Tunnels and Shafts, Based on Measurements of the Deformability of the Rock, Proc. 7th Cong. Large Dams, Rome, Q.25, pp. 679-707.

LOMBARDI, G. (1973), Dimensioning of Tunnel Linings with Regard to Constructional Procedure, Tunnels and Tunnelling, Vol. 5, pp. 340-351.

LOMBARDI, G. (1974), The Problems of Tunnel Supports, Proc. 3rd ISRM Cong., Denver, Vol. III, pp. 109-113.

LOMBARDI, G. (1979), Quelques remarques à propos de la méthode convergence-confinement, Tunnels et Ouvrages souterrains, No. 32, pp. 87-92.

PANET, Marc (1976), Analyse de la stabilité d'un tunnel creusé dans un massif rocheux en tenant compte du comportement après la rupture, *Rock Mechanics* 8, pp. 209-223.

PANET, M. (1979), Les déformations différées dans les ouvrages souterrains, Proc. 4th Int. Congress Int. Soc. Rock Mechanics, Montreux Vol. 3, Rotterdam, Balkema, pp. 291-301.

PANET, M. (1995), Calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 177 pages.

TERZAGHI, K. (1946), Rock defects and loads on tunnel supports, Rock tunnelling with steel supports, The commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio.

WICKHAM, G.E., TIEDEMANN, H.R. et SKINNER, E.H., (1972), Support Determinations Based on Geologic Predictions, Proc. 1st Rapid Excavation and Tunneling Conf., Chicago, vol. 1, pp 43-64.

WICKHAM, G.E., TIEDEMANN, H.R. et SKINNER, E.H., (1974), Ground Support Prediction Model – RSR Concept, Proc. 2d Rapid Excavation and Tunneling Conf., San Francisco, vol. 1, pp 691-707.

Annexe I

Structure des fichiers pour l'approche numérique

Loi de comportement de Maxwell

```

new
title
TUNNEL CIRCULAIRE AVEC SOUTÈNEMENT
config creep axi extra=8
call burg.fis
set step 10000000
gr 200 2
gen 1.29625,-0.075 1.29625,0.075 1.525,0.075 1.525,-0.075 i 1,10
gen 1.525,-0.075 1.525,0.075 20,0.075 20,-0.075 ratio 1.025 1 i 10,201
;utilise le modèle élastique pour la convergence instantanée
m e i=10,200
fix y
apply sxx -6.9e6 i 201
ini sxx -6.9e6
ini syy -6.9e6
ini szz -6.9e6
set sratio=1e-9
set fo=100

m m_burgers i=10,200
prop d=1 m_k=5.862e9 m_k1=2.069e9 m_k2=5.862e9
prop m_vis1=20.69e25 m_vis2=4.135e15
solve
;his reset
his nst=10
his unbal ;his 1

```

his crtime ;his 2
his sxx i 1 j 1 ;his 3
his sxx i 2 j 1 ;his 4
his sxx i 3 j 1 ;his 5
his sxx i 4 j 1 ;his 6
his sxx i 5 j 1 ;his 7
his sxx i 6 j 1 ;his 8
his sxx i 7 j 1 ;his 9
his sxx i 8 j 1 ;his 10
his sxx i 9 j 1 ;his 11
his sxx i 10 j 1 ;his 12
his sxx i 11 j 1 ;his 13
his sxx i 12 j 1 ;his 14
his sxx i 13 j 1 ;his 15
his sxx i 14 j 1 ;his 16
his sxx i 15 j 1 ;his 17
his sxx i 16 j 1 ;his 18
his sxx i 17 j 1 ;his 19
his sxx i 18 j 1 ;his 20
his sxx i 19 j 1 ;his 21
his sxx i 20 j 1 ;his 22
his sxx i 21 j 1 ;his 23
his sxx i 22 j 1 ;his 24
his sxx i 23 j 1 ;his 25
his sxx i 24 j 1 ;his 26
his sxx i 25 j 1 ;his 27
his sxx i 26 j 1 ;his 28
his sxx i 27 j 1 ;his 29

```

his sxx i 28 j 1      ;his 30
his sxx i 29 j 1      ;his 31
his sxx i 30 j 1      ;his 32

set fo=1e-3
; set creep parameters
; creep parameters based on elastic out-of-balance forces
; timestep will double when fob less than 5e3
set fob1=5e3 lmul=1.5 umul=1 max=1e2 min=1e-1
set crdt=auto
solve age 2e6
;ajouter le revêtement
m e i=1,9
prop d=1 b=0.69625455e9 s=0.52219091e9
solve age 50e6
save flumax.sav

```

Loi de comportement de Zener

```

new
title
TUNNEL CIRCULAIRE AVEC SOUTÈNEMENT
config creep axi extra=8
call burg.fis
set step 10000000

gr 200 2
gen 0.85,-0.075 0.85,0.075 1.0,0.075 1.0,-0.075 i 1,10

```

```
gen 1.0,-0.075 1.0,0.075 20,0.075 20,-0.075 ratio 1.025 1 i 10,201
```

```
;utilise le modèle élastique pour la convergence instantanée
```

```
m e i=10,200
```

```
fix y
```

```
apply sxx -7.586e6 i 201
```

```
ini sxx -7.586e6
```

```
ini syy -7.586e6
```

```
ini szz -7.586e6
```

```
m m_burgers i=10,200
```

```
prop d=1 m_k=3.448e9 m_k1=2.069e9 m_k2=2.069e9
```

```
prop m_vis1=20.69e9 m_vis2=20.69e15
```

```
set sratio=1e-6
```

```
set fo=100
```

```
solve
```

```
;his reset
```

```
his nst=10
```

```
his unbal ;his 1
```

```
his crtime ;his 2
```

```
his sxx i 1 j 1 ;his 3
```

```
his sxx i 2 j 1 ;his 4
```

```
his sxx i 3 j 1 ;his 5
```

```
his sxx i 4 j 1 ;his 6
```

```
his sxx i 5 j 1 ;his 7
```

```
his sxx i 6 j 1 ;his 8
```

```
his sxx i 7 j 1 ;his 9
```

```
his sxx i 8 j 1 ;his 10
```

```
his sxx i 9 j 1 ;his 11
```

```

his sxx i 10 j 1;his 12
his sxx i 11 j 1;his 13
his sxx i 12 j 1;his 14
his sxx i 13 j 1;his 15
his sxx i 14 j 1;his 16
his sxx i 15 j 1;his 17
his sxx i 16 j 1;his 18
his sxx i 17 j 1;his 19
his sxx i 18 j 1;his 20
his sxx i 19 j 1;his 21
his sxx i 20 j 1;his 22
his sxx i 21 j 1;his 23
his sxx i 22 j 1;his 24
his sxx i 23 j 1;his 25
his sxx i 24 j 1;his 26
his sxx i 25 j 1;his 27
his sxx i 26 j 1      ;his 28
his sxx i 27 j 1      ;his 29
his sxx i 28 j 1      ;his 30
his sxx i 29 j 1      ;his 31
his sxx i 30 j 1      ;his 32

```

```

set fo=1e-3
; set creep parameters
; creep parameters based on elastic out-of-balance forces
; timestep will double when fob less than 5e3
set fobl=5e3 lmul=1.5 umul=1 max=2e-4 min=2e-6
set crdt=auto

```

```

solve age 0.95
;ajouter le revêtement
m e i=1,9
prop d=1 b=21.9225225e9 s=16.4418919e9
solve age 95
save flurig.sav

```

Loi de comportement loi de puissance

```

new
title
TUNNEL CIRCULAIRE AVEC SOUTÈNEMENT
config creep axi extra=8
gr 200 2
gen 0.85,-0.075 0.85,0.075 1.0,0.075 1.0,-0.075 i 1,10
gen 1.0,-0.075 1.0,0.075 20,0.075 20,-0.075 ratio 1.025 1 i 10,201
;utilise le modèle élastique pour la convergence instantanée
m e i=10,200
fix y
apply sxx -10e6 i 201
ini sxx -10e6
ini syy -10e6
ini szz -10e6
set sratio 1e-9
set fo=100
set step 10000000

m p i=10,200

```

```
prop d=1 bu=9000e6 s=931.0345e6
prop a_1=4.31E-26 n_1=3.36
solve
```

```
m e i=1,9
prop d=1 b=21.6667e9 s=10e9
;his reset
his nst=10
his unbal           ;his 1
his crtime          ;his 2
his sxx i 1 j 1     ;his 3
his sxx i 2 j 1     ;his 4
his sxx i 3 j 1     ;his 5
his sxx i 4 j 1     ;his 6
his sxx i 5 j 1     ;his 7
his sxx i 6 j 1     ;his 8
his sxx i 7 j 1     ;his 9
his sxx i 8 j 1     ;his 10
his sxx i 9 j 1     ;his 11
his sxx i 10 j 1;his 12
his sxx i 11 j 1;his 13
his sxx i 12 j 1;his 14
his sxx i 13 j 1;his 15
his sxx i 14 j 1;his 16
his sxx i 15 j 1;his 17
his sxx i 16 j 1;his 18
his sxx i 17 j 1;his 19
his sxx i 18 j 1;his 20
```

```

his sxx i 19 j 1;his 21
his sxx i 20 j 1;his 22
his sxx i 21 j 1;his 23
his sxx i 22 j 1;his 24
his sxx i 23 j 1;his 25
his sxx i 24 j 1;his 26
his sxx i 25 j 1;his 27
his sxx i 26 j 1      ;his 28
his sxx i 27 j 1      ;his 29
his sxx i 28 j 1      ;his 30
his sxx i 29 j 1      ;his 31
his sxx i 30 j 1      ;his 32
his xdisp i 1 j 1      ;his 33
his xdisp i 10 j 1     ;his 34
his xvel i 10 j 1      ;his 35

set fo=1e-3
; set creep parameters
; creep parameters based on elastic out-of-balance forces
; timestep will double when fob less than 5e3
set fobl=5e3 lmul=1.5 umul=1 max=5e-5 min=2e-8
set crdt=auto
solve age 15.6865939
save flupow.sav

```

Annexe 2

Structure des fichiers pour l'approche graphique

Convergence-confinement modifiée

Loi de comportement de Maxwell

```

; Maxwell - cylindrical cavity
config creep
gr 30,10
m vis
; use FISH to generate a quarter-symmetry donut-shaped mesh
ca qdonut.fis
set rmin=1.0 rmul=20.0 ratio=1.1
qdonut
; properties and stresses in Pascal units (not MPa)
prop vis=4.135e15 bulk=5.871e9 shear=5.862e9 dens=2000
; boundary and initial conditions
fix x j=1 1
fix y j=1
apply press 6.9e6 i=3 1
ini sxx -6.9e6 syy -6.9e6 szz -6.9e6
;
; come to elastic equilibrium
solve
; permet de redéfinir la limite d'équilibre des forces non-balancées
;      pour résoudre le problème en terme de temps
set fo 1
hist unbal
hist crtime
hist xdis i 1 j 1
;
; Permet de définir les paramètres pour calculer automatiquement les

```

```

;intervalles de temps
;
def interval
    netape=10.0
    temps=10e6
    lining=2e6
    deltat=(temps-lining)/netape
    b=1.525
end
;
; set creep parameters
; creep parameters based on elastic out-of-balance forces
; timestep will double when fob less than 5e3
set fobl=5e3 lmul=1.5 umul=1 max=1e3 min=2e-4
set crdt=auto
solve age 2e6
set fobl=5e3 lmul=2 umul=1 max=1e3 min=1
;
def deplace
    interval
    etape=netape-1
    ti=lining+(deltat/2)
    forc=0.0
    command
        solve age ti
        hist forc
    end_command
    loop n (1,etape)

```

```

ti=ti+deltat
po=6.9e6
forceajo=6.9e5
forc=forc+(forceajo/netape)
command
    set crdt=0
    set fo 100
    apply press forc
    step 1000
    set crdt=auto
    set fo 1
    solve age ti
end_command
end_loop
ti=ti+(deltat/2)
forc=forc+(forceajo/netape)
command
    set crdt=0
    set fo 100
    apply press forc
    step 1000
    set crdt=auto
    set fo 1
    solve age ti
end_command
end
deplace
def mou

```

```

    mou=xdisp(1,1)*b
end
save t10-p02.sav

```

Loi de comportement de Zener

Équilibre élastique + jusqu'à l'installation du soutènement

```

new
title
TUNNEL CIRCULAIRE AVEC SOUTÈNEMENT
config creep axi extra=8
call burger.fis

gr 30 2
gen 0.85,-0.075 0.85,0.075 1.0,0.075 1.0,-0.075 i 1,5
gen 1.0,-0.075 1.0,0.075 20,0.075 20,-0.075 ratio 1.1 1 i 5,31
;utilise le modèle élastique pour la convergence instantanée
m m_burger i=5,31
fix y
apply sxx -7.586e6 i 3 1
ini sxx -7.586e6
ini syy -7.586e6
ini szz -7.586e6

prop d=1 m_k=3.4483e9 m_k1=2.069e9 m_k2=2.069e9
prop m_vis1=20.69e9 m_vis2=20.69e15
his xdisp i 5 j 1
; équilibre élastique

```

```
solve
```

```
set fo=1e-3
```

```
; set creep parameters
```

```
; creep parameters based on elastic out-of-balance forces
```

```
; timestep will double when fob less than 5e3
```

```
set fobl=5e3 lmul=1.5 umul=1 max=2e-4 min=2e-6
```

```
set crdt=auto
```

```
solve age 0.95
```

```
save soute.sav
```

Application de la méthode convergence-confinement modifiée

```
re soute.sav
```

```
def interval
```

```
    netape=2.0
```

```
    temps=1.9
```

```
    lining=.95
```

```
    deltat=(temps-lining)/netape
```

```
end
```

```
;
```

```
def deplace
```

```
    interval
```

```
    etape=netape-1
```

```
    ti=lining+(deltat/2)
```

```
    forc=0.0
```

```
    command
```

```
        solve age ti
```

```

        hist forc
    end_command
    loop n (1,etape)
        ti=ti+deltat
        tp=ti-deltat
        po=7.586e6
        forceajo=7.586e5
        forc=forc+(forceajo/netape)
        command
            set crdt=0
            set fo 100
            apply press forc i 5
            set cr 0
            solve
            set cr=tp
            set crdt=auto
            set fo 1
            solve age ti
            print xdisp i 5 j 1
            print forc
        end_command
    end_loop
    ti=ti+(deltat/2)
    tp=ti-(deltat/2)
    forc=forc+(forceajo/netape)
    command
        set crdt=0
        set fo 100

```

```

        apply press forc i 5
        set cr 0
        step 3000
        set cr tp
        set crdt=auto
        set fo 1
        solve age ti
    end_command
end
deplace
set fo=100
set crdt=0
set cr=0
solve
save at1-p02.sav

```

Loi de comportement loi de puissance

Équilibre élastique + jusqu'à l'installation du soutènement

```

new
title
TUNNEL CIRCULAIRE AVEC SOUTÈNEMENT
config creep axi extra=8

gr 200 2
gen 0.85,-0.075 0.85,0.075 1.0,0.075 1.0,-0.075 i 1,10
gen 1.0,-0.075 1.0,0.075 20,0.075 20,-0.075 ratio 1.025 1 i 5,201
;utilise le modèle élastique pour la convergence instantanée

```

```

m e i=10,200
fix y
apply sxx -10e6 i 201
ini sxx -10e6
ini syy -10e6
ini szz -10e6
set sratio 1e-9
set fo=100

m p i=10,200
prop d=1 bu=9000e6 s=931.0345e6
prop a_1=4.31E-26 n_1=3.36

solve
save powelas.sav

```

Application de la méthode convergence-confinement modifiée

```

re powelas.sav
his nst=10
his unbal      ;his 1
his crtime     ;his 2
his xdis i 5 j 1 ;his 3
his sxx i 5 j 1 ;his 4
his sxx i 4 j 1 ;his 5
his xvel i 5 j 1 ;his 6

def interval

```

```

    netape=2.0
    temps=1
    lining=0
    deltat=(temps-lining)/netape
    b=1.0
end

set fo=1e-3
; set creep parameters
; creep parameters based on elastic out-of-balance forces
; timestep will double when fob less than 5e3
set fobl=5e3 lmul=1.5 umul=1 max=5e-5 min=2e-8
set crdt=auto

def deplace
    interval
    etape=netape-1
    forc=0.0
    tp=0.0
    loop n (1,netape)
        po=10e6
        forceajo=netape*(7e6/20)
        forc=forc+(forceajo/netape)
        ti=exp(7.966885*ln(fort)-107.225)
        command
            set crdt=0
            set fo 100
            apply press forc i=5
    end
end

```

```
        set cr=0
        solve
        set cr=tp
        set crdt=0.00005
        set fo 1e-3
        solve age ti
    end_command
    fort=forc
    tp=exp(7.966885*ln(fort)-107.225)
end_loop
end
deplace
solve
save 3bp02.sav
```

Annexe 3

Influence du nombre de pas

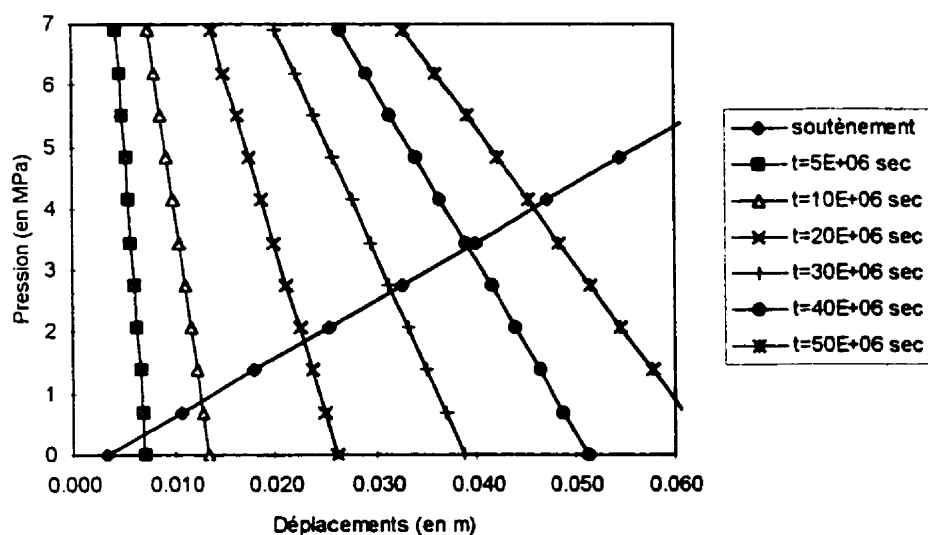


Figure A-3.1 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la première itération

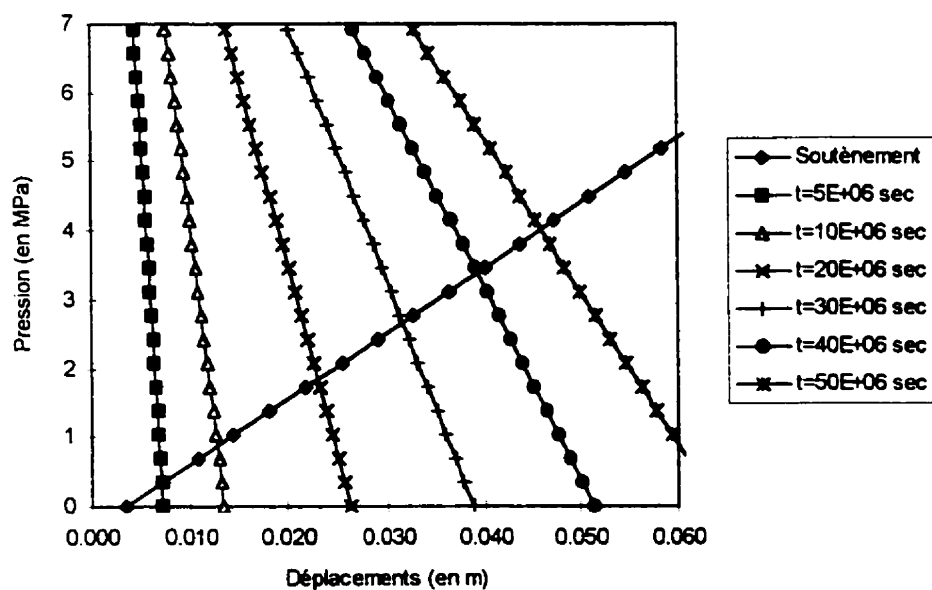


Figure A-3.2 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec vingt incréments de pression ($h=20$) lors de la première itération

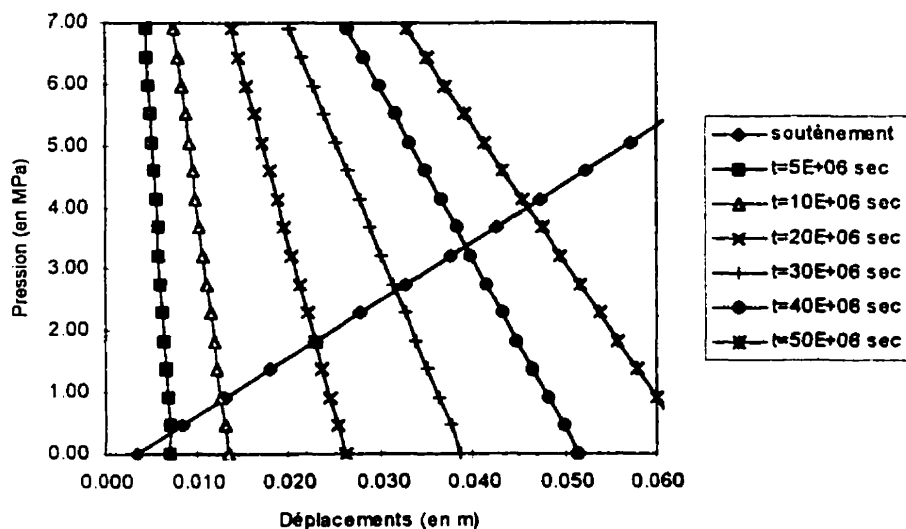


Figure A-3.3 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec cinquante incréments de pression ($h=50$) lors de la première itération

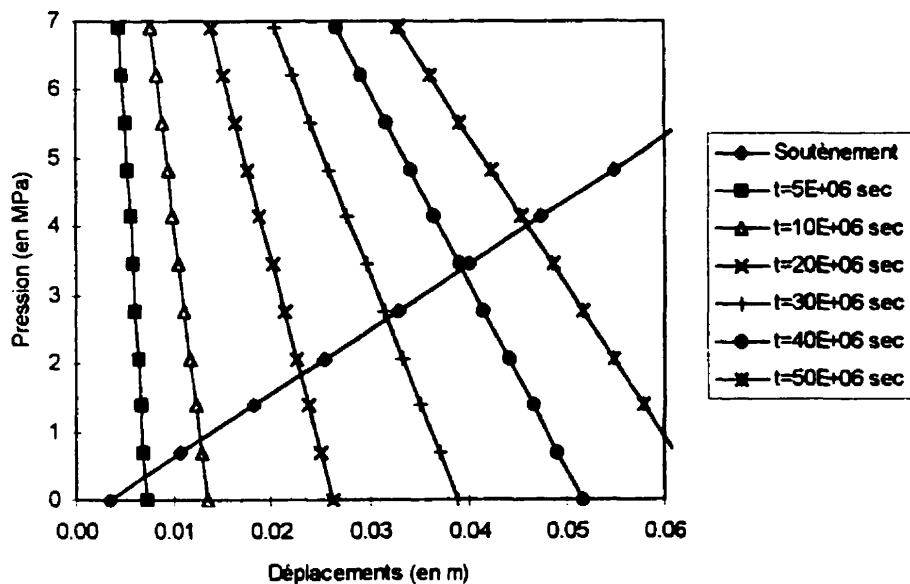


Figure A-3.4 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec soixante-quinze incréments de pression ($h=75$) lors de la première itération

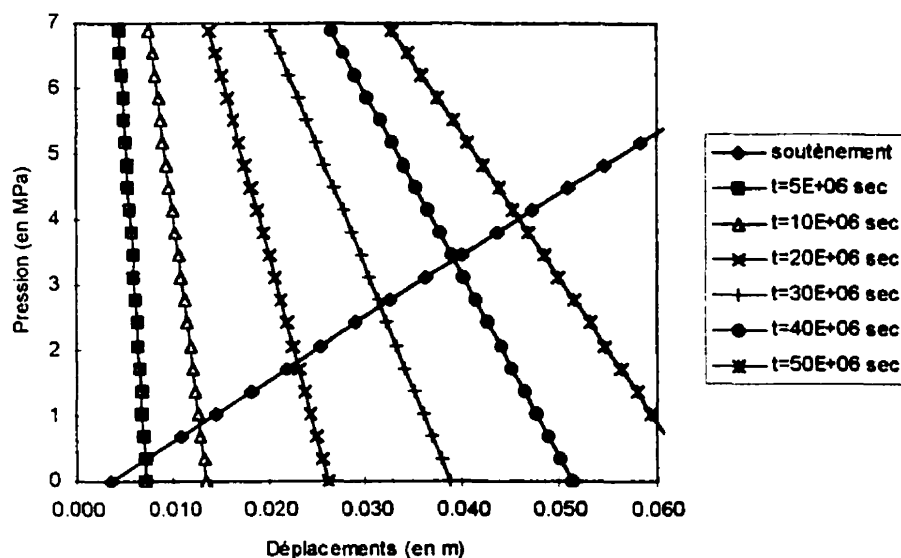


Figure A-3.5 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec cent incréments de pression ($h=100$) lors de la première itération

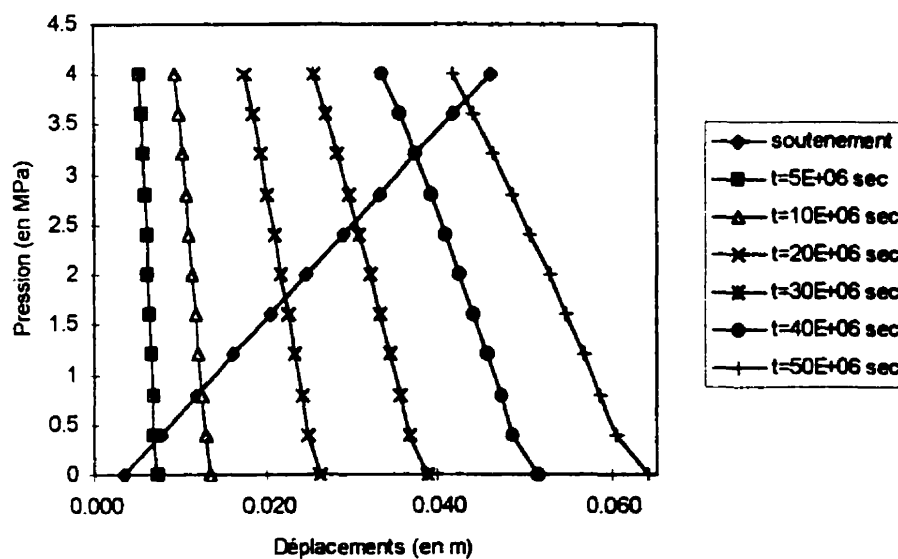


Figure A-3.6 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la seconde itération

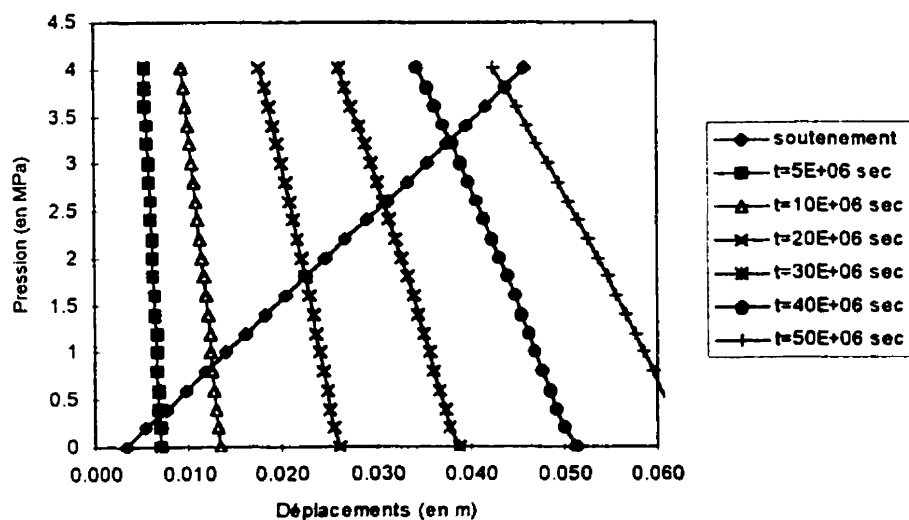


Figure A-3.7 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec vingt incréments de pression ($h=20$) lors de la seconde itération

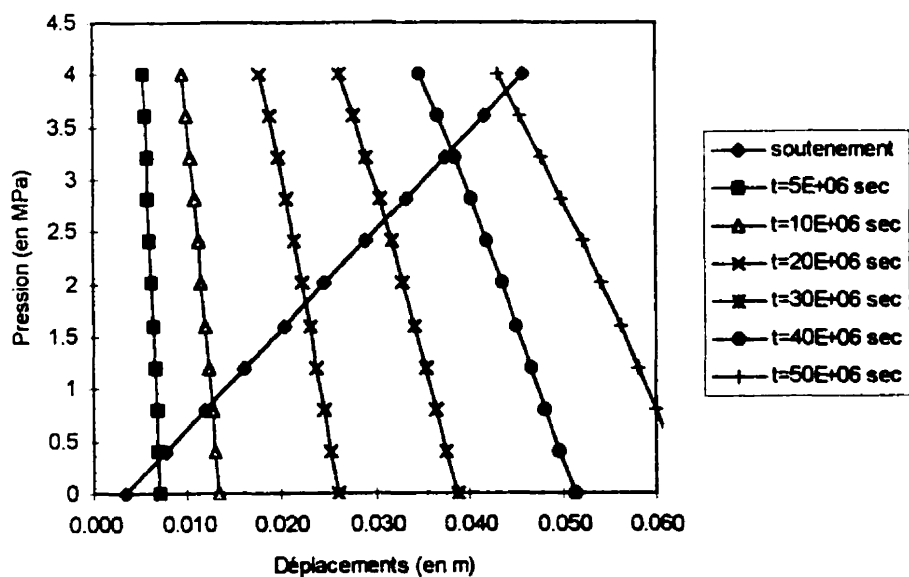


Figure A-3.8 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec cinquante incréments de pression ($h=50$) lors de la seconde itération

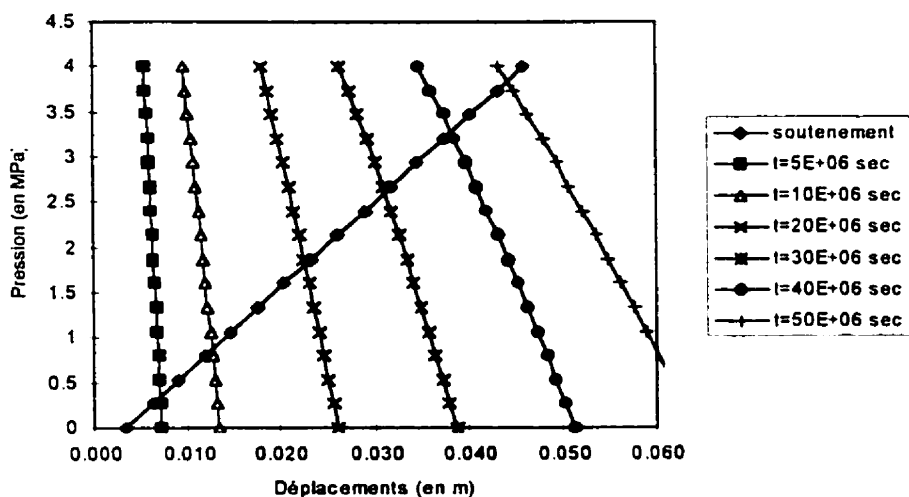


Figure A-3.9 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec soixante-quinze incréments de pression ($h=75$) lors de la seconde itération

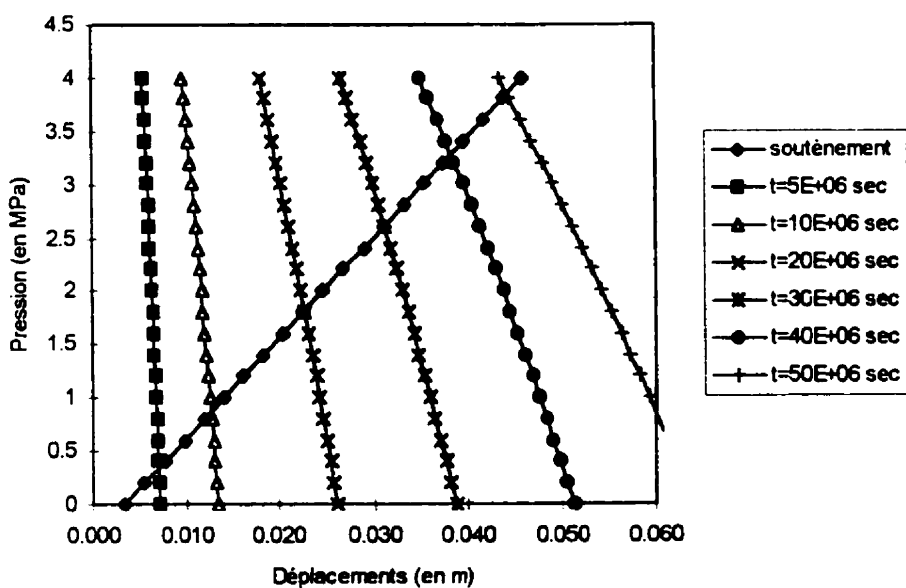


Figure A-3.10 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Maxwell avec cent incréments de pression ($h=100$) lors de la seconde itération

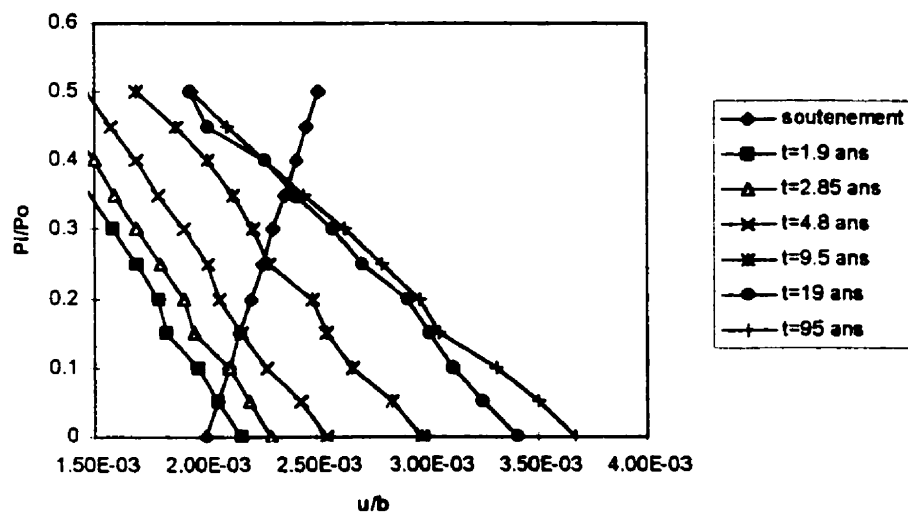


Figure A-3.11 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la première itération

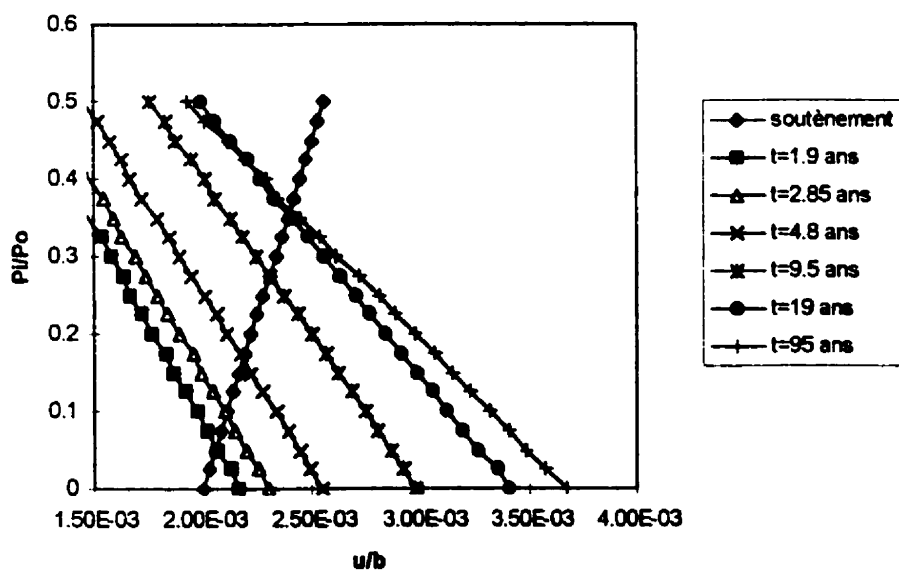


Figure A-3.12 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec vingt incréments de pression ($h=20$) lors de la première itération

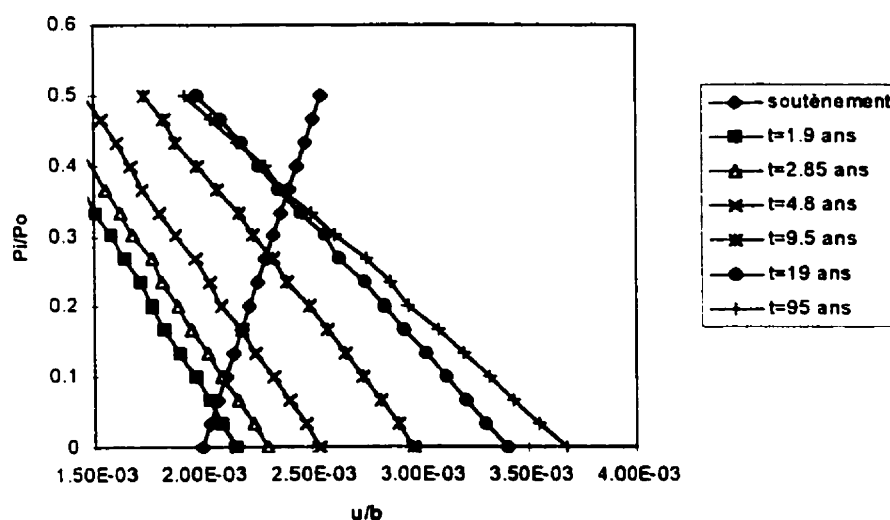


Figure A-3.13 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec trente incréments de pression ($h=30$) lors de la première itération

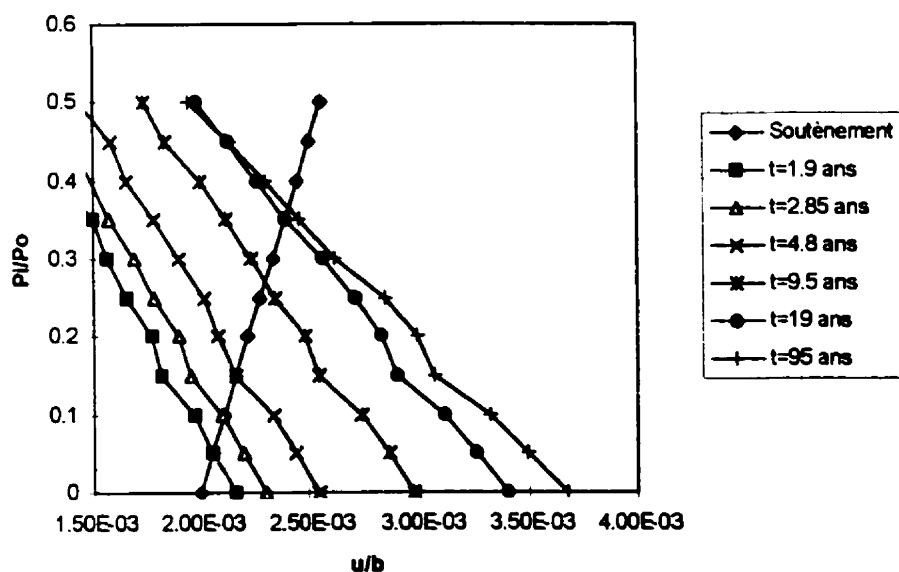


Figure A-3.14 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec cinquante incréments de pression ($h=50$) lors de la première itération

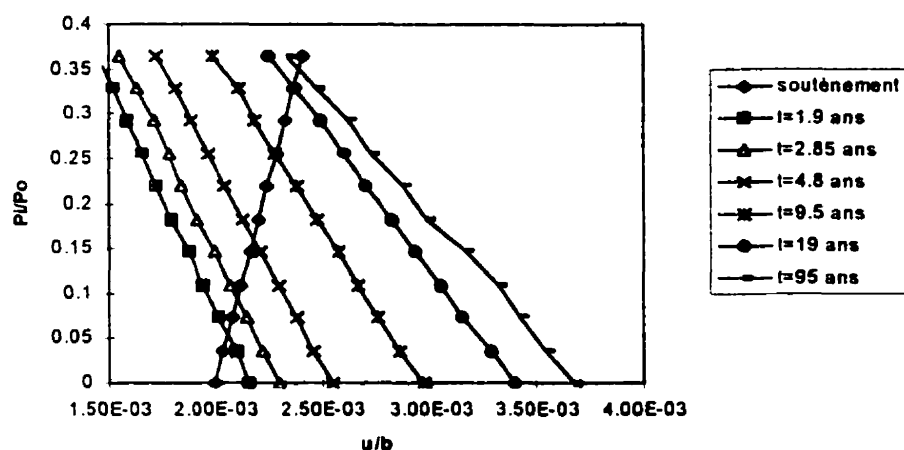


Figure A-3.15 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la seconde itération

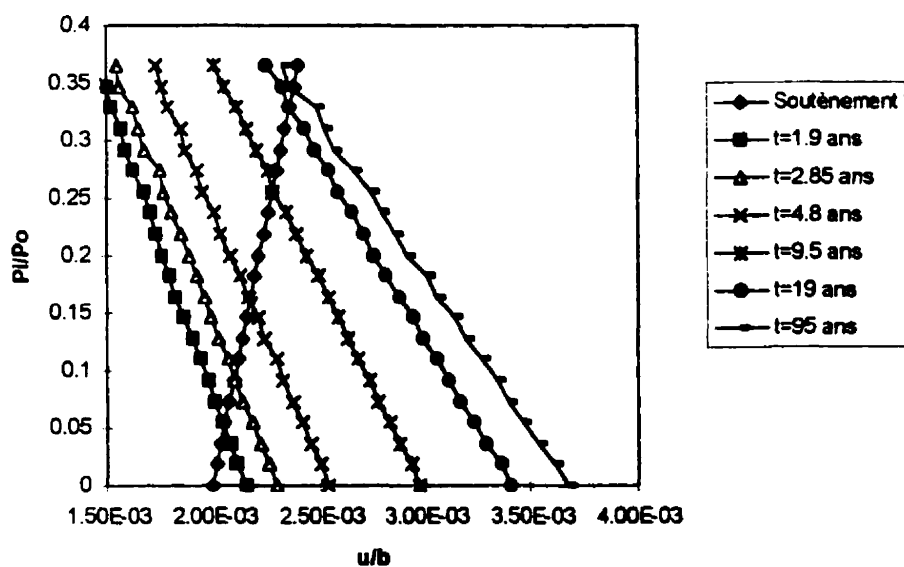


Figure A-3.16 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec vingt incréments de pression ($h=20$) lors de la seconde itération

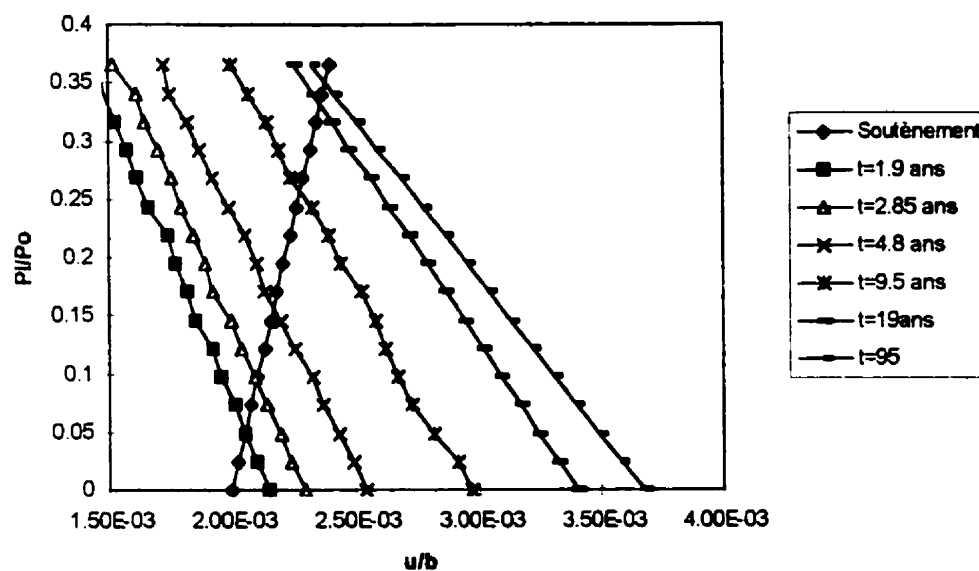


Figure A-3.17 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec trente incréments de pression ($h=30$) lors de la seconde itération

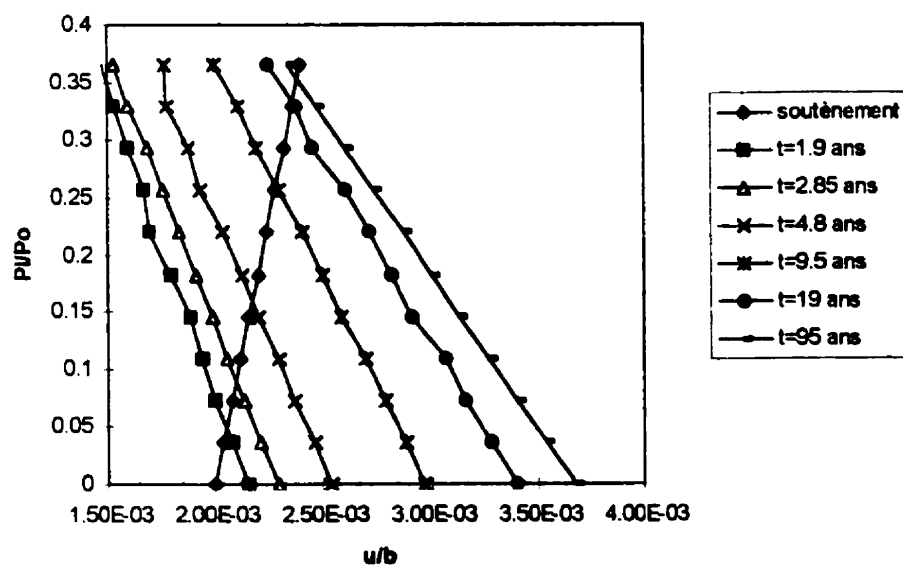


Figure A-3.18 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement de Zener avec cinquante incréments de pression ($h=50$) lors de la seconde itération

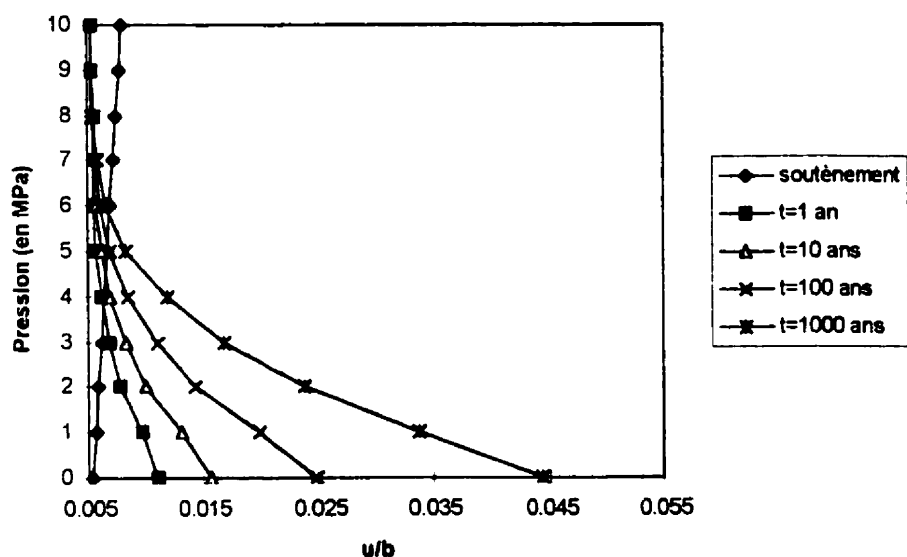


Figure A-3.19 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la première itération

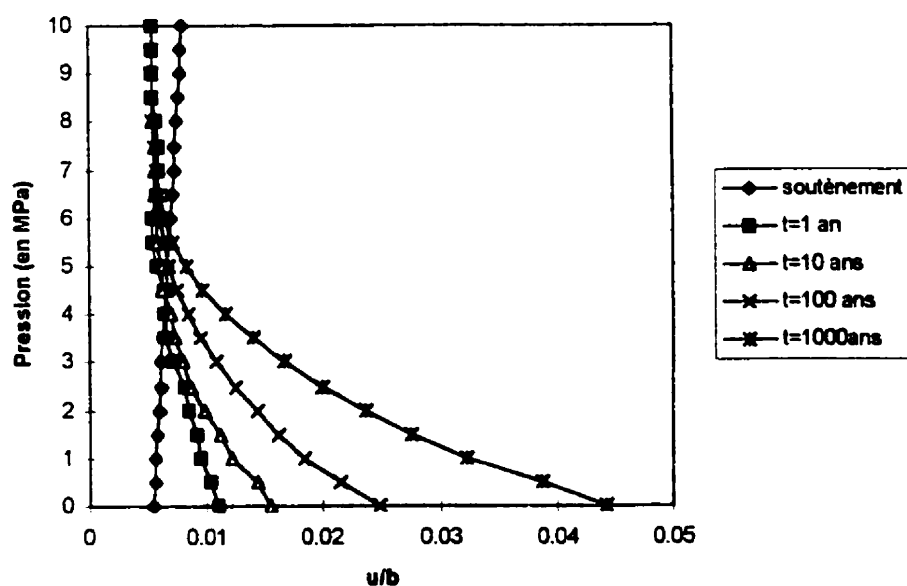


Figure A-3.20 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec vingt incréments de pression ($h=20$) lors de la première itération

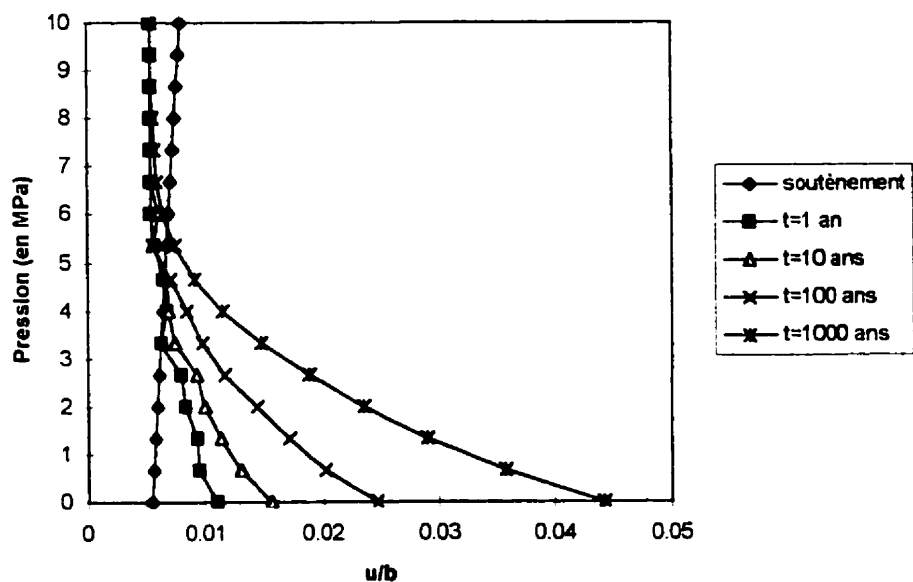


Figure A-3.21 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec trente incréments de pression ($h=30$) lors de la première itération

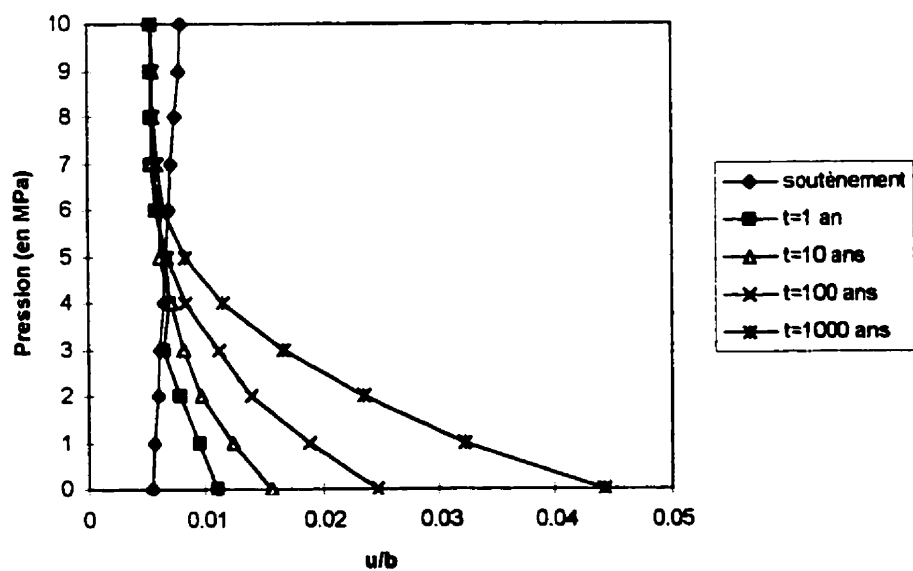


Figure A-3.22 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec cinquante incréments de pression ($h=50$) lors de la première itération

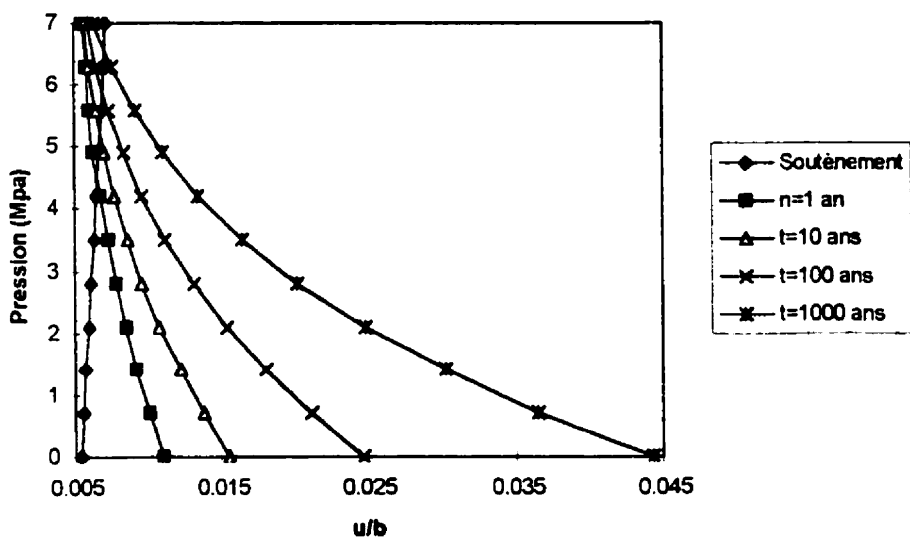


Figure A-3.23 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la seconde itération

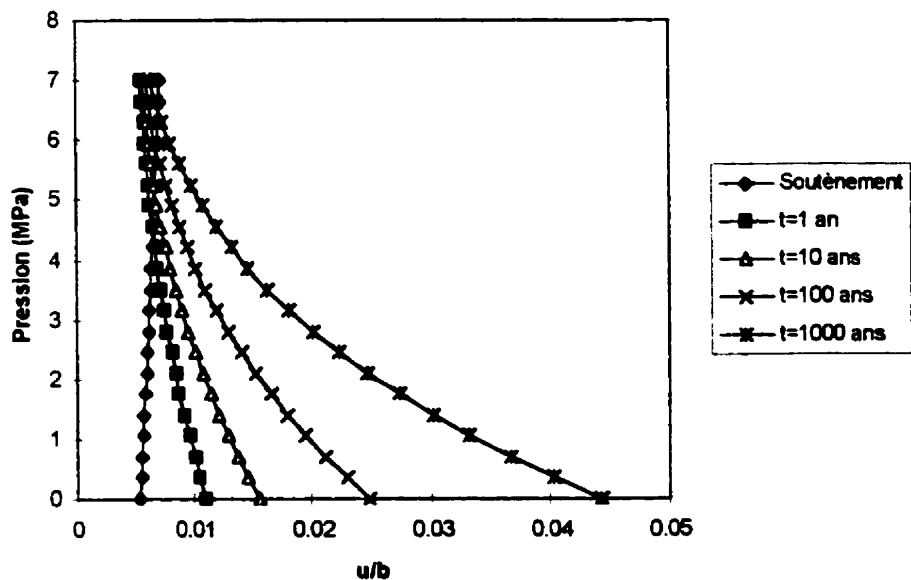


Figure A-3.24 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec vingt incréments de pression ($h=20$) lors de la seconde itération

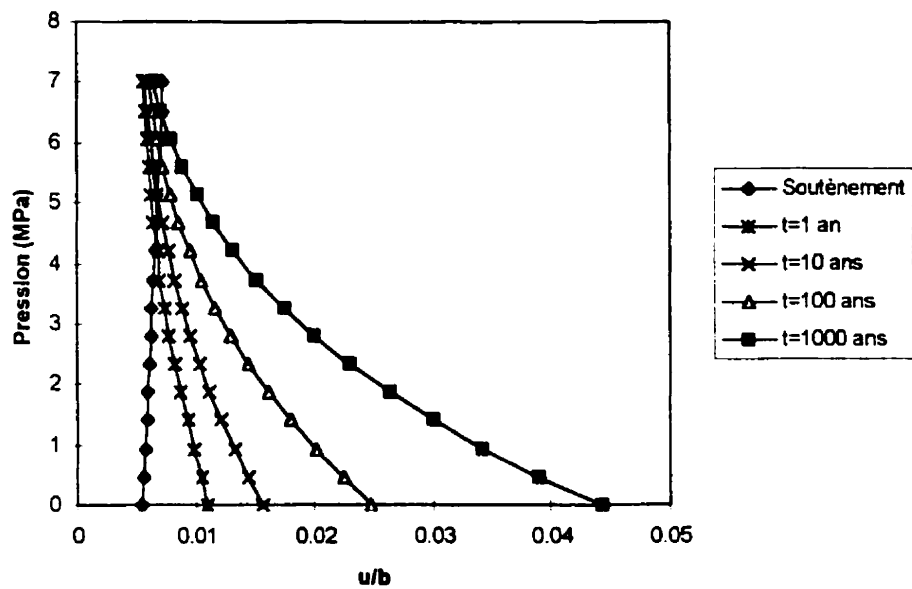


Figure A-3.25 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec trente incréments de pression ($h=30$) lors de la seconde itération

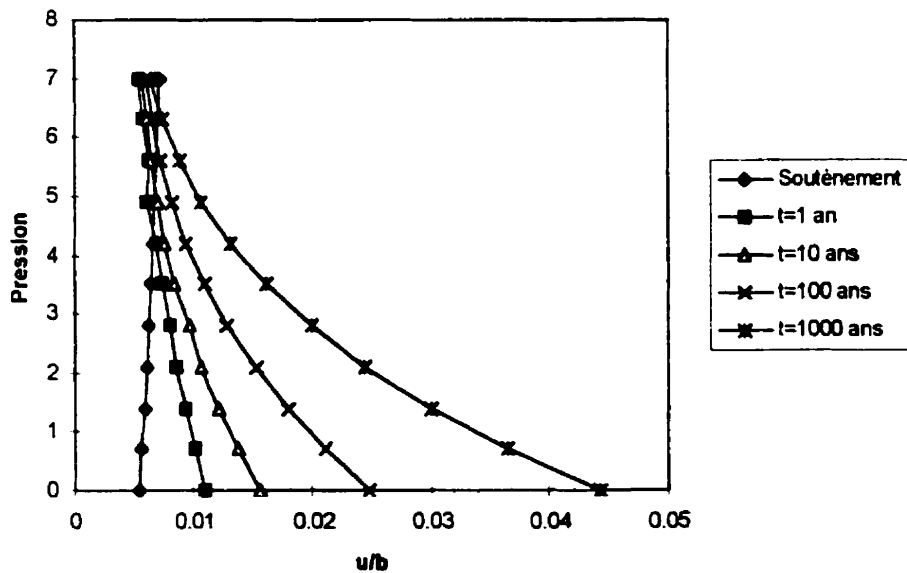


Figure A-3.26 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec cinquante incréments de pression ($h=50$) lors de la seconde itération

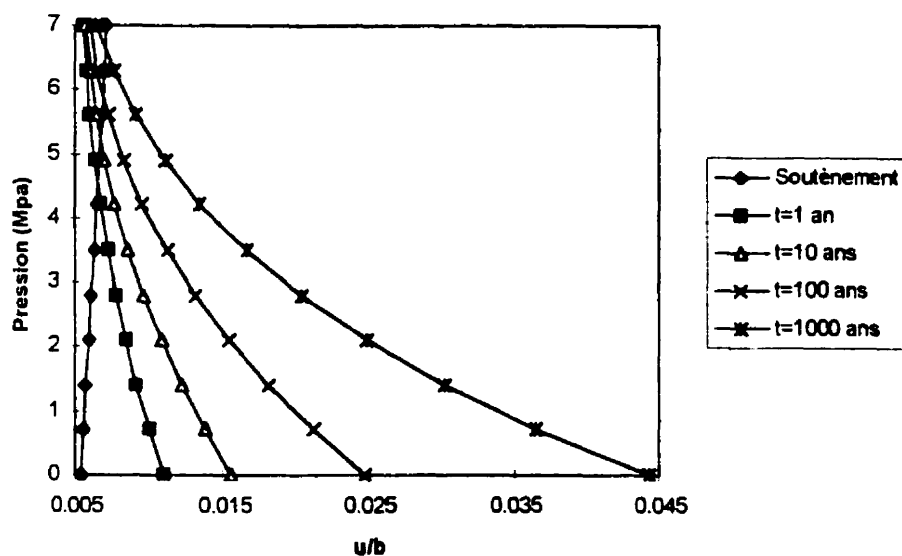


Figure A-3.27 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec dix incréments de pression ($h=10$) lors de la troisième itération

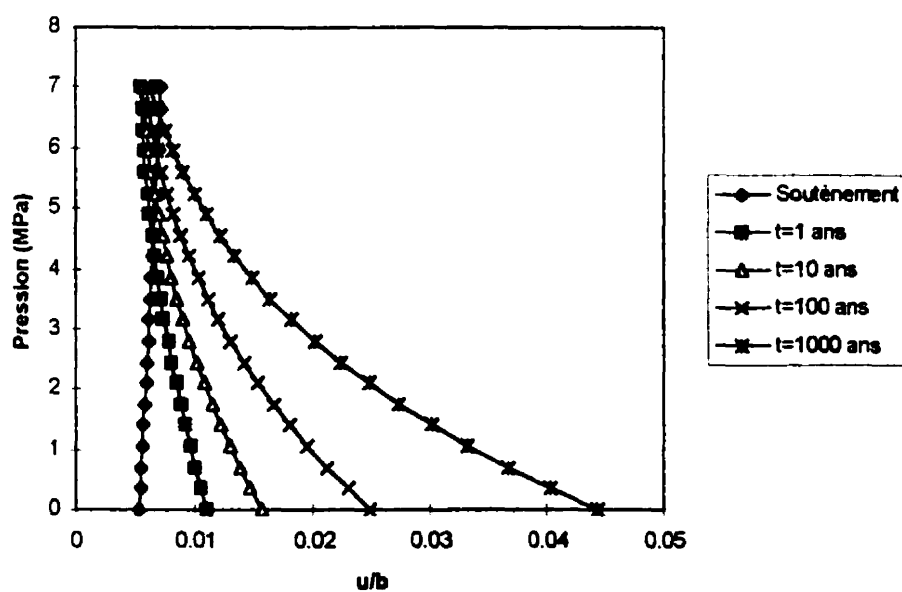


Figure A-3.28 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec vingt incréments de pression ($h=20$) lors de la troisième itération

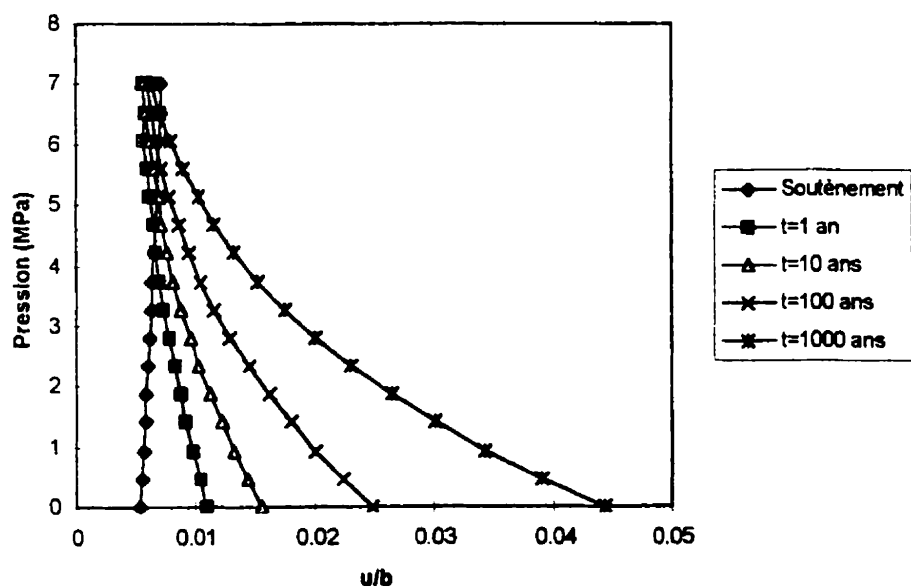


Figure A-3.29 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec trente incréments de pression ($h=30$) lors de la troisième itération

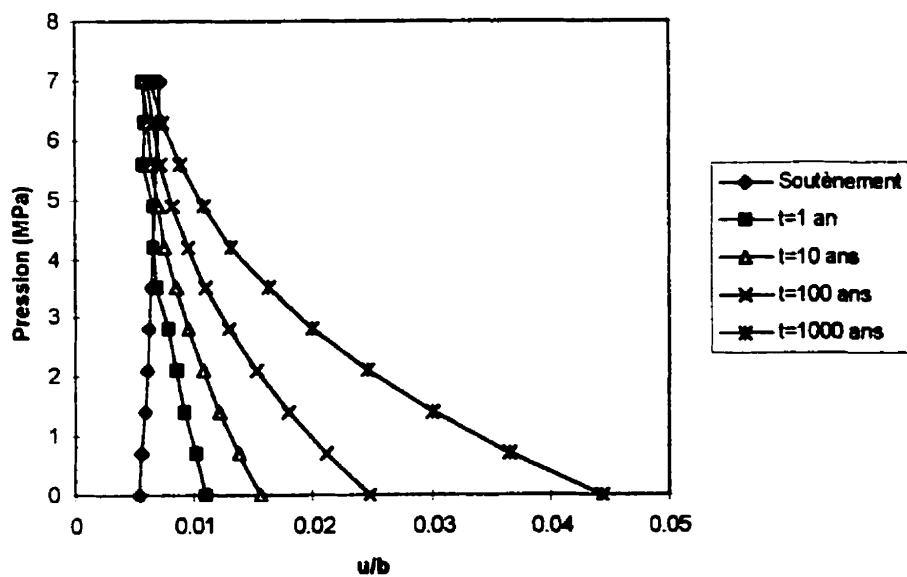


Figure A-3.30 Diagramme d'interaction entre le soutènement et le massif obéissant à une loi de comportement loi de puissance avec cinquante incréments de pression ($h=50$) lors de la troisième itération