



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

136 0090155

ECOLE DOCTORALE PROMEN

[11] 1996 KHEDER K

THESE

présentée devant l'Institut National Polytechnique de Lorraine
en vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'I.N.P.L.
Génie Civil et Minier

par

Khaled KHEDER

METHODOLOGIE D'ETUDES DE LA STABILITE DES CARRIERES SOUTERRAINES COMPLEXES EXPLOITEES PAR CHAMBRES ET PILIERS ABANDONNES

soutenue publiquement le 2 juillet 1996

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

Président : **C. CHAMBON**

Rapporteurs : **J. M. SIWAK
J. MANIA**

Examineurs : **E. LAATAR
J. J. TRITSCH
F. WOJTKOWIAK
J. P. PIGUET**

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

	page
AVANT PROPOS.....	8
RESUME.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCTION.....	12

PREMIERE PARTIE

APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES CARRIERES SOUTERRAINES

1. LES CARRIERES SOUTERRAINES EN FRANCE.....	15
1.1. Les carrières souterraines de la région parisienne.....	15
1.2. Les carrières souterraines de la Gironde	15
1.3. Les carrières souterraines du Nord	16
1.4. Les carrières souterraines de Maine-et-Loire.....	17
2. DEGATS ET ACCIDENTS.....	18
3. METHODES APPLIQUEES.....	18
3.1. Méthodes analytiques.....	18
3.1.1. Analyse de la stabilité des piliers	
3.1.2. Analyse de la stabilité du toit	
3.1.3. Autres modèles analytiques	
3.2. Méthodes numériques.....	20
3.2.1. La méthode des éléments finis	
3.2.2. La méthode des éléments distincts	
3.2.3. Les méthodes à l'équilibre limite	

TABLE DES MATIERES

4. EXEMPLES D'APPLICATIONS DE METHODES NUMERIQUES POUR L'ETUDE DES EXPLOITATIONS PAR CHAMBRES ET PILIERS.....	22
4.1. Analyse locale.....	22
4.2. Analyse globale.....	22
4.3. Autres modèles numériques.....	23
4.4. Conclusion.....	24
5. POSITION DU PROBLEME.....	25

DEUXIEME PARTIE

QU'EST CE QU'UNE CARRIERE SOUTERRAINE COMPLEXE ?

1. DEFINITION.....	27
2. BASE DE DONNEES CARRIERES.....	29
2.1. Introduction.....	29
2.2. Méthologie.....	30
2.3. Choix des variables.....	30
2.3.1. <i>Les caractéristiques mécaniques et physiques</i>	
2.3.2. <i>Les caractéristiques géométriques</i>	
2.3.3. <i>La dégradation dans les carrières</i>	
2.3.4. <i>Les facteurs de complexité</i>	
2.4. Analyses statistiques.....	33
2.4.1. <i>Première analyse</i>	
2.4.2. <i>Deuxième analyse</i>	
2.5. Conclusion.....	37

TABLE DES MATIERES

TROISIEME PARTIE

COMMENT MODELISER DES CARRIERES SOUTERRAINES COMPLEXES ?

1. INTRODUCTION.....	39
2. COMMENT EVALUER LES SOLLICITATIONS DANS LE CAS DES CARRIERES A FLANC DE FALAISE ?.....	39
2.1. Introduction.....	39
2.2. Comment calculer l'état initial ?.....	40
<i>2.2.1. Calculs analytiques</i>	
<i>2.2.2. Calcul numérique</i>	
2.3. Calcul par phases : approche par éléments finis.....	42
<i>2.3.1. Introduction</i>	
<i>2.3.2. Phasage des travaux</i>	
<i>2.3.3. Résultats et interprétations</i>	
<i>2.3.4. Conclusion</i>	
2.4. Comment focaliser l'analyse sur un domaine particulier ?.....	44
<i>2.4.1. Introduction</i>	
<i>2.4.2. Modèle à petite échelle</i>	
2.5. Discussion.....	46

TABLE DES MATIERES

3. COMMENT EVALUER LES SOLLICITATIONS DANS LE CAS DES CARRIERES MULTI-NIVEAUX ?	46
3.1. Introduction	46
3.2. Sollicitation des ouvrages : premier exemple	46
<i>3.2.1. Les carrières souterraines classées de Meudon</i>	
<i>3.2.1. Choix des coupes en 2D</i>	
<i>3.2.2. Interprétation des résultats</i>	
<i>3.2.3. Conclusion</i>	
3.3. Sollicitation des ouvrages : deuxième exemple	49
<i>3.3.1. Le modèle choisi</i>	
<i>3.3.2. Comment tenir compte des dimensions des piliers</i>	
<i>3.3.3. Résultats et interprétations</i>	
<i>3.3.4. Conclusion</i>	
4. COMMENT PRENDRE EN COMPTE LES DISCONTINUITES ?	52
4.1. Introduction	52
<i>4.1.1. Discontinuités naturelles et induites</i>	
4.2. Hypothèses de calcul	53
4.3. Comment peut-on choisir les discontinuités ?	54
4.4. Cas d'une carrière souterraine sous un flanc de coteau	54
<i>4.4.1. Introduction</i>	
<i>4.4.2. Les principaux résultats</i>	
<i>4.4.3. Conclusion</i>	
4.5. Cas d'une carrière souterraine multi-niveaux	56
<i>4.5.1. Introduction</i>	
<i>4.5.2. Résultats avant effondrement</i>	
<i>4.5.3. Résultats après effondrement</i>	
<i>4.5.4. Conclusion</i>	

TABLE DES MATIERES

5. COMMENT TENIR COMPTE DE LA TROISIEME DIMENSION ?.....	58
5.1. Cas d'une carrière souterraine sous un flanc de coteau.....	58
<i>5.1.1. Introduction</i>	
<i>5.1.2. Le modèle</i>	
<i>5.1.3. Les principaux résultats</i>	
<i>5.1.4. Comparaison des résultats</i>	
<i>5.1.5. Pilier H : calcul par modèle</i>	
5.2. Cas d'une carrière souterraine multi-niveaux.....	63
<i>5.2.1. Introduction</i>	
<i>5.2.2. Calcul RESOBLOK</i>	
5.3. Conclusion.....	64
CONCLUSION GENERALE.....	66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	70
LISTE DES TABLEAUX.....	86
LISTE DES FIGURES.....	88
ANNEXE 1	
ANNEXE 2	

AVANT PROPOS

La présente thèse a pour objectif de mettre au point une méthodologie d'étude opérationnelle pour les cas de carrières souterraines complexes.

Un tel travail nécessite une grande compréhension des sites à partir des archives. Mes remerciements vont à ceux qui m'ont aidé le long de ces trois années de recherche que ce soit à l'Institut National de l'environnement et des risques industriels (INERIS), au Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) et aux Services Départementaux d'Inspection des Carrières Souterraines (SDICS).

Avant tout je tiens à remercier Monsieur **CHAMBON C.**, Professeur à l'Ecole des Mines de Nancy et Monsieur **PIGUET J. P.**, Directeur du Laboratoire de Mécanique des Terrains et Professeur à l'Ecole des Mines de Nancy qui ont suivi de près cette étude. Ainsi j'exprime ma profonde reconnaissance à tous les deux, pour leurs conseils et leurs aides qui ont été pour moi d'une grande valeur.

Je remercie tout particulièrement Messieurs **TRITSCH J. J.** et **WATELET J. M.**, Ingénieurs à l'INERIS. Grâce à leur expérience dans les carrières souterraines, j'ai pu mener à terme ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux experts qui ont contribué à cette étude, Monsieur le **PAS de SECHEVAL H.** Directeur adjoint à l'Inspection Générale des Carrières de la région parisienne et Ingénieur en chef des services techniques, Monsieur **BIVERT B.** Chef du Service Départemental d'Inspection des Carrières souterraines du Nord, Monsieur **PARAGALLO J.**, Docteur Ingénieur auprès du conseil général de la Gironde, Direction des Infrastructures, Bureau des Carrières et des Gravières et Madame **MAISONNEUVE E.** Ingénieur Géologue, responsable du Service Départemental de Géologie et des carrières Souterraines de Maine-et-Loire. Ils ont bien voulu collaborer avec notre laboratoire dans cette étude.

Je leur associe également Monsieur **FEUGA B.**, Professeur associé à l'Ecole des Mines de Nancy, Directeur Technique du CESTEMIN qui m'a aidé dans la recherche de la base de données "carrières souterraines".

Je remercie Messieurs les membres du jury, qui ont bien voulu examiner notre travail. Monsieur **MANIA J.**, Professeur à l'Université de Franche compté. Monsieur **SIWAK J. M.**, Professeur à l'Ecole des Mines de Douai. Monsieur **LAATAR E.**, Professeur à l'Université Tunisienne de Sud (Sfax) et Directeur de l'Institut Supérieur des Enseignements Technologiques de Gafsa. Monsieur **WOJTKOWIAK F.**, Docteur Ingénieur et Directeur Adjoint du Service Sol, Sous-sol et Eco-système de l'Institut National de l'Environnement et des Risques naturels

Je tiens à remercier également Madame **HOMAND F.**, Professeur à l'Ecole Nationale de Géologie de Nancy, Directeur du Laboratoire de Géomécanique et Directeur de la formation doctorale.

AVANT PROPOS

Je remercie toutes les personnes que j'ai pu rencontrer durant les trois années de ma thèse en France et à l'étranger et qui m'ont accueillies dans leurs laboratoires et institutions. Monsieur **BROQUET P.**, Professeur à l'Université de Franche compté et Directeur du Laboratoire de Géologie Appliquée à Besançon. Monsieur **HUMBERT P.**, Directeur du service mécanique des sols et des roches, responsable du code de calcul numérique CESAR-LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Monsieur **LAATAR E.**, Professeur à l'Université Tunisienne de Sud (Sfax) et Directeur de l'Institut Supérieur des Enseignements Technologiques de Gafsa.

Je remercie également tous les chercheurs et DEA du Laboratoire de Mécanique des Terrains pour leurs encouragements et leurs soutiens dont j'ai bénéficié durant ces trois années, plus particulièrement Monsieur **DODO AMADOU B.** pour sa forte collaboration.

Sans oublier les chercheurs du Laboratoire de Géomécanique à Vandoeuvre que j'ai connus et plus particulièrement Monsieur **MRABET Z.** et Monsieur **MAMANE I.** pour leurs collaboration de même.

Merci aussi à Mademoiselle **THIEBAUD C.**, Chercheur au Laboratoire de Géologie Appliquée à Besançon. Elle a bien voulu accepter de travailler avec moi sur un site particulier (carrière souterraine de Grozon).

Je remercie tout le personnel du Laboratoire de Mécanique des terrains et plus particulièrement Madame **MILONET D.** et Madame **SCHENCK C.** pour la bonne présentation de ce mémoire et l'aide qu'elles m'ont offertes le long ces quatre années de recherche.

Enfin, je remercie tous les membres de ma famille et tous mes amis, qui m'ont soutenu, encouragé le long de ces quatre années de recherche, plus particulièrement **SIDHOM N.**

RESUME

RESUME

Les carrières souterraines à faible profondeur sont très répandues sur le territoire français. Compte tenu de la méthode d'exploitation par chambres et piliers abandonnés ces carrières se dégradent au fil de temps. Cette dégradation est liée en fait à des facteurs internes (exploitation) et/ou à des facteurs externes (géologiques ou industriels).

A l'heure actuelle, de graves accidents ont été répertoriés dans différentes régions en France, c'est pourquoi le ministère de l'environnement attache une attention importante à la lutte contre les instabilités imprévues.

Dans ce mémoire, nous présentons les principaux résultats obtenus suivant des points clés :

- Création d'une base de données "carrières souterraines complexes", suivie des analyses statistiques permettant de bien repérer les causes de complexité.
- Evaluation de la sollicitation sur les ouvrages en tenant compte de l'état initial avant excavation, du phasage des travaux, en focalisant l'analyse sur un domaine particulier et en effectuant une comparaison entre les codes de calcul en 2D et 3D. Nous avons pris en compte dans cette étude deux cas complexes : les carrières à flanc de falaise et les carrières multi-niveaux.

Pour mieux évaluer l'ensemble des sollicitations, il est intéressant de tenir compte dans un modèle des discontinuités induites et naturelles.

Grâce à la montée en puissance de la capacité des ordinateurs, nous avons réussi à fonder un modèle tridimensionnel capable d'apporter des éléments nouveaux à l'interprétation.

Enfin, une conclusion générale récapitulant notre réflexion pour fonder une méthodologie complète destinée à mieux comprendre les mécanismes de rupture dans les carrières souterraines de type complexes, les prévoir et les prévenir.

ABSTRACT

ABSTRACT

In France, there are many underground quarries at weak depth worked with pillars and rooms. In the time these old working provoke degradation which link to internal factors (exploitation) and/or to external factors (geological or industrial).

At the present time, many seriously accident have been listed in different regions in France, in fact the government attaches great importance to fight against the instabilities unknown.

In this thesis, we present the following results :

- Data base complex underground quarries research and statistical analysis, for the purpose of marking the complexity reason.
- Evaluation of stresses into account the initial state before excavation, phases of working, focalization of analysis on a particular zone and a comparison between 2D and 3D codes. We have taken into account in this study the quarries beneath hillside and the quarries at many levels.

The stresses depend a lot of mechanical and geological discontinuities, in fact, it is interesting to take them into account in the modelling.

For better explain the true mechanisms of failure in the quarries, we have used a tridimensional modelling for further interpretation.

At the end, we finish with a conclusion which summarizes the complete methodology for understand the failure mechanisms in the complex underground quarries, to expect them and to inform them.

INTRODUCTION

Les carrières souterraines à faible profondeur sont très répandues en France. Elles se situent généralement à proximité des grandes villes et elles ont été exploitées par la méthode des chambres et piliers abandonnés. Il s'agit le plus souvent d'anciennes exploitations de calcaire, de craie ou de gypse ou autres, matériaux essentiellement utilisés pour la construction. Beaucoup de ces carrières se dégradent dans le temps et menacent la stabilité des biens à la surface.

Dans certaines régions en France, cette dégradation aboutira à des phénomènes particuliers tels que :

- Les instabilités locales, comme les chutes de toit et fontis. Les chutes de toit se développent lorsque la largeur de galerie dépasse une limite dite critique, au delà de laquelle, le toit immédiat fléchit et subit des fractures d'extension. Une rupture progressive du toit peut aboutir au mécanisme de rupture dit "fontis". Ce dernier phénomène peut donc apparaître pour une faible largeur d'exploitation et quand la couverture est formée de roches de faible cohésion. Ces instabilités se caractérisent donc par leur progressivité et par une bonne compréhension du processus de rupture.

- Les effondrements localisés se manifestent généralement lorsqu'on dépasse une limite critique du taux de défrètement (surface exploitée par rapport à la surface totale de l'exploitation). Ils se développent aussi lorsque l'exploitation atteint une certaine dimension L qui est fonction de la hauteur de recouvrement H (TRITSCH et al, 1986) [23]. Ces instabilités ont un caractère brutal ou progressif et le mécanisme de rupture est complexe.

- Les effondrements généralisés, qu'ils soient progressifs ou brusques (le plus souvent brutaux), résultent d'un mécanisme d'ensemble qui concerne un volume important de l'exploitation. Ils se développent dans la plupart des cas pour des dimensionnements critiques et se manifestent sous des formes très diverses mais toujours potentiellement dangereuses. Ils se caractérisent par l'ampleur de la zone affectée qui peut concerner plusieurs dizaines de millions de mètre cube de roche pour les plus importants.

Les phénomènes d'effondrement les plus dangereux ont été observés dans certaines carrières souterraines au Sud Est de la France (Gironde), la région parisienne et le Nord (Nord-pas-de-Calais). Compte tenu de leur incidence au niveau de la sécurité des biens et des personnes à la surface, plusieurs programmes de recherche ont été entrepris pour lutter contre tout danger d'effondrement.

Dans un premier temps, ces programmes de recherche ont permis de maîtriser les situations comportant des configurations d'exploitation assez classiques, et assez régulières, mettant en jeu des mécanismes relativement simples et au bout du compte assez bien identifiés. Mais, il est apparu aussi que beaucoup de situations critiques concernaient des carrières où l'analyse se heurtait à la complexité des configurations, à la diversité des facteurs influençant ce comportement, à la difficulté d'estimer l'état de sollicitations etc.... De là est venue l'appellation de "carrières souterraines complexes", qui sera précisée, plus concrètement dans la suite du mémoire.

INTRODUCTION

Cette étude a pour objectif de fonder une méthodologie opérationnelle pour les cas de carrières complexes. Les étapes suivies sont présentées dans ce document :

- La première partie présente un aperçu bibliographique sur les carrières souterraines. Nous aborderons les principaux travaux réalisés sur ce sujet en France et à l'étranger.

- La deuxième partie englobe une base de données carrières souterraines complexes suivie d'une étude statistique pour repérer les principales causes de complexité.

- La troisième partie présente les résultats de la modélisation avec toutes ses formes, qui a été menée dans des carrières souterraines complexes bien particulières. L'objectif de cette modélisation est de répondre aux questions suivantes :

- Comment évaluer les sollicitations dans des carrières souterraines à flanc de falaise ou multi-niveaux ?.

- Comment focaliser l'étude sur un domaine particulier à partir d'un grand modèle ?.

- Comment prendre en compte les discontinuités induites et/ou naturelles dans les piliers et au toit ?.

- Comment tenir compte de la troisième dimension ?.

La conclusion générale résume la méthodologie élaborée et dégage les principaux points à développer dans le cadre de la recherche, dans le domaine des carrières souterraines à faible profondeur.

PREMIERE PARTIE

**APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES
CARRIERES SOUTERRAINES**

1. LES CARRIERES SOUTERRAINES EN FRANCE

L'exploitation en souterrain de la pierre de taille a touché l'ensemble du territoire français. La concentration la plus forte est en relation avec la qualité de la pierre (figure I.1a).

Quatre grandes régions en France ont connu une forte exploitation par carrières souterraines. La région parisienne, la région du Sud-Ouest et la région du Nord et la région du Maine-et-Loire (figure I.1b).

1.1. Les carrières souterraines de la région parisienne

Les anciennes carrières de Paris ont été ouvertes dans les bancs calcaires (partie inférieure du terrain tertiaire), et connus depuis longtemps par les géologues sous le nom de calcaire grossier. Ces bancs forment, réunis, une épaisseur cumulée de 15 à 20 mètres; mais ils ne sont pas tous propres à la construction. Les assises utilement exploitables n'ont pas ensemble plus de 5 à 6 mètres de puissance (VACHAT J. C., 1982 [41]).

Les exploitations de calcaire grossier ne sont d'ailleurs pas les seules que comporte le bassin tertiaire de Paris. Les tableaux I.1 & I.2 rassemblent les principales formations de la région parisienne (FILLIAT G., 1981 [54]).

Dans la région parisienne l'exploitation de pierre de taille a été faite par différentes méthodes qui dépendent du temps et du lieu. D'une part, des exploitations à ciel ouvert qui représentent les plus anciennes des exploitations. Les hauteurs d'exploitation sont très variables. Ces anciennes carrières ont le plus souvent, été transformées en décharges publiques. D'autre part, des exploitations souterraines, où on exploite souvent plusieurs niveaux superposés. On distingue plusieurs modes d'exploitation : par piliers tournés, par galeries en rameaux, par hagues et bourrage et par dépilage (VACHAT J. C., 1982 [41]).

En ce qui concerne l'exploitation par piliers tournés, il s'agit de creuser des galeries formant un réseau orthogonal laissant subsister dans la masse des piliers intacts. Le taux de défrètement atteignait souvent 75 à 80 %. Les principaux matériaux exploités par piliers tournés ont été les suivants :

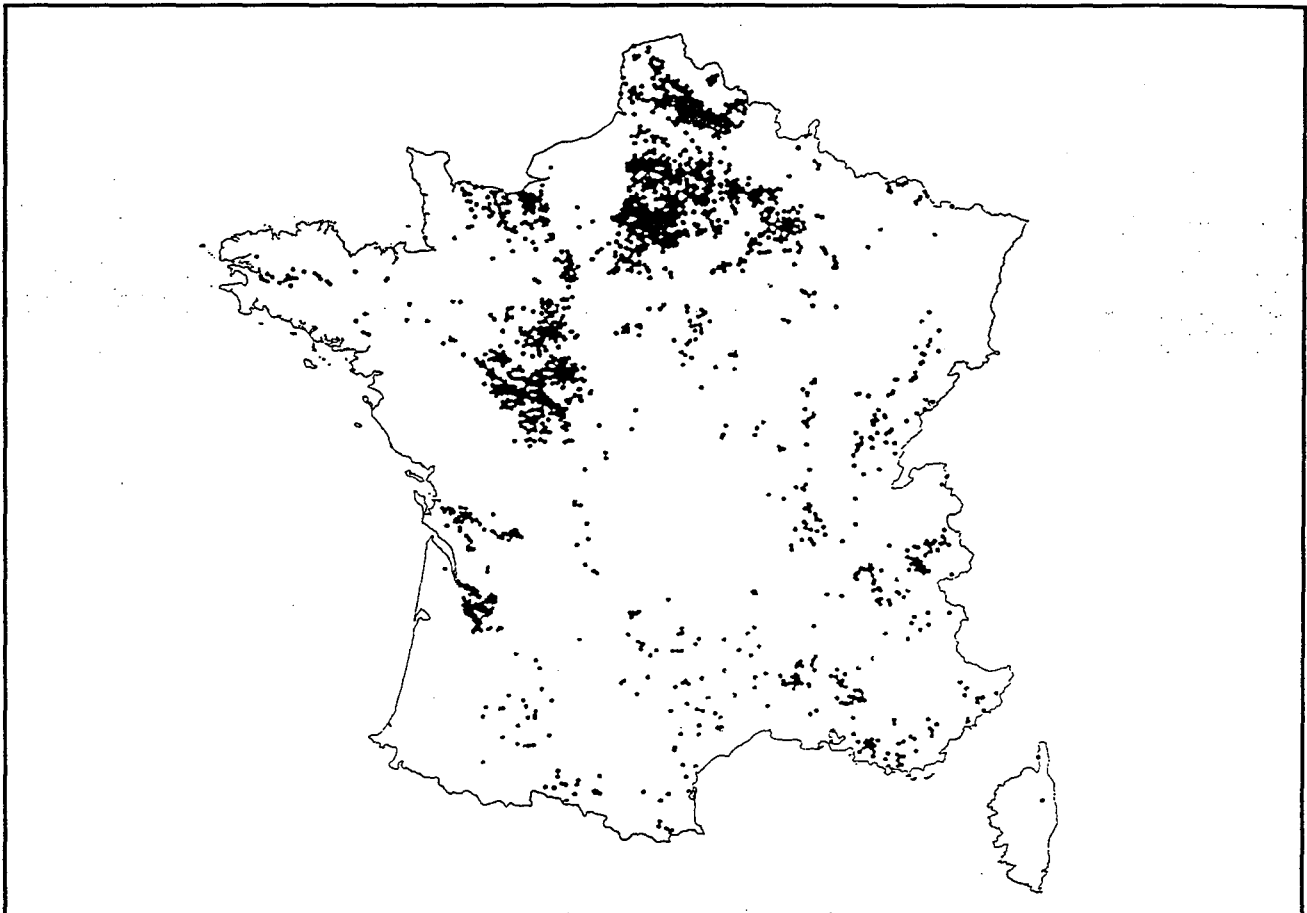
- le gypse, exploité selon ce mode presque uniquement dans trois niveaux. La dimension différente des piliers dans chacun des niveaux fait que ceux-ci ne se superposent pas.
- la craie, dont quelques exploitations modernes sur deux étages offrent l'image de piliers à peu près superposés.
- le calcaire grossier, qui offre très peu d'exemples de piliers superposés dans la région parisienne à l'exception de petites zones à Paris (14^{ème} arrondissement) et à Charenton (Val-de-Marne).

Dans notre base de données, nous avons rassemblé des carrières de la craie du Campanien et en particulier les carrières classées de la commune de Meudon, des carrières de calcaire grossier et des carrières de gypse (voir annexe 2).

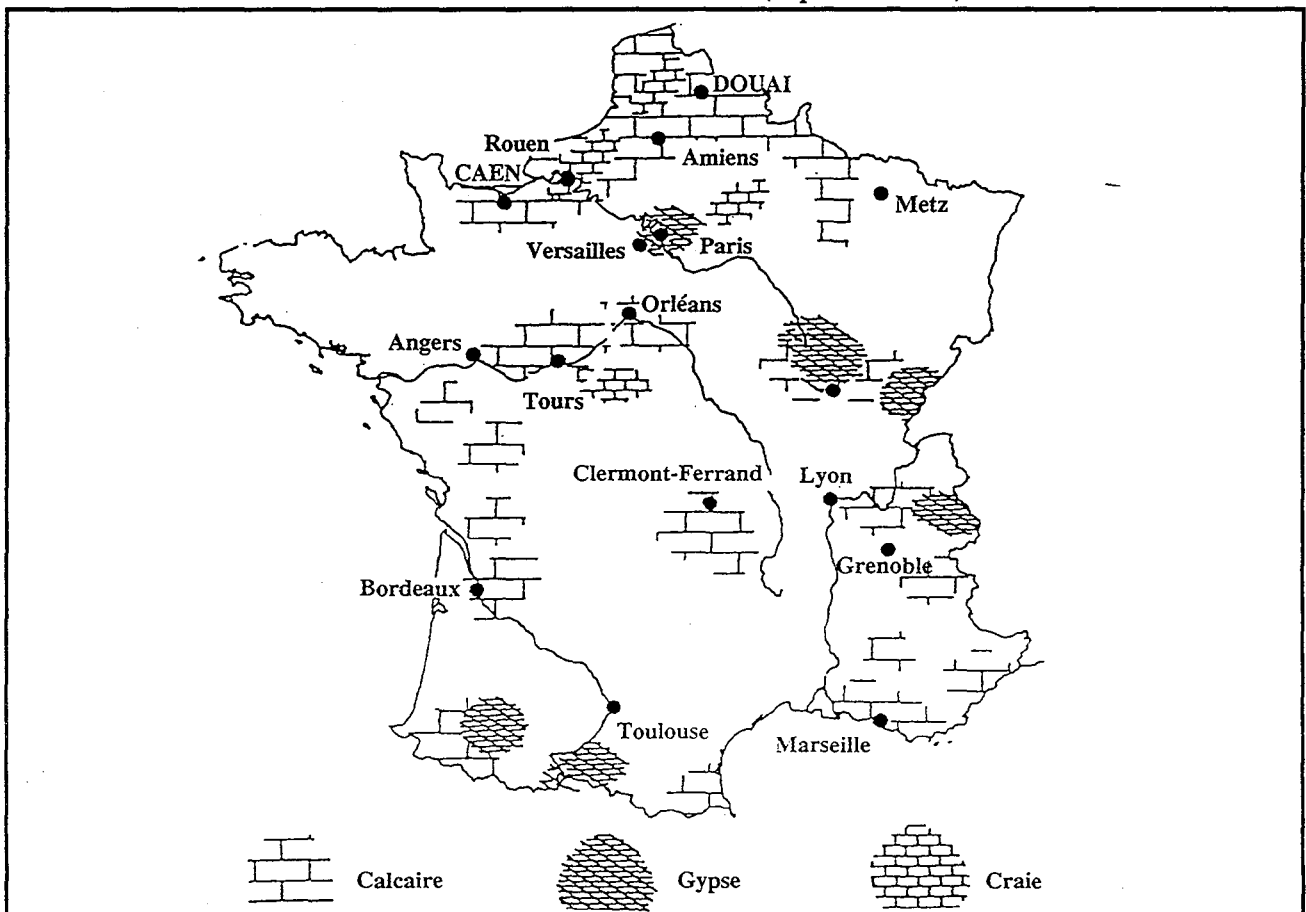
1.2. Les carrières souterraines de la Gironde

Pendant le XI^e et XII^e siècles la région de la Gironde a connu une forte expansion économique à la suite de l'occupation anglaise et du commerce du vin.

Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE



a : Les carrières souterraines en France (d'après le BRGM).



b : Localisation des principales carrières souterraines en France.

Figure I.1 : L'exploitation de la pierre de taille en souterrain en France.

Partie I - Aperçu bibliographique

Ere	Système	Etage	sous-étage	Symboles	Formation
IV	Holocène			R TV Am	Remblais Terre végétale Alluvions modernes Gps : pseudomorphose de gypse
	Pléistocène			E L LP Aa	Eboulis Loess Limon des plateaux Alluvions anciennes
III	Oligocène	Stampien	Aquitanién	MB	Meulière de Beauce
			Stampien s. str.	SF MH	Sables de Fontainebleau Marnes à huîtres
			Stampien inférieur	TB GV	Travertin de Brie Glaises vertes
			"Sannoisien"	MC	Marnes à Cyrènes
	Eocène	Bartonien	Ludien	MSG CC G1 MFL G2 ML G3 MPH	Marnes supra-gypseuses Calcaire de Champigny Gypse 1re masse Marnes à fers de lance Gypse 2e masse Marnes à Lucines Gypse 3e masse Marnes à Pholadomyes
				G4 MIG SV SO CM CD	Gypse 4e masse Marnes infra-gypseuses Sables verts Calcaire de Saint-Ouen Calcaire de Mortefontaine Calcaire de Ducy
			Auversien	SB	Sables de Beauchamp
		Lutétien	Lut. sup.	M et C	Marnes et caillasses
			Lutétien moy.	CG	Calcaire grossier CGs : Bacs francs, Liais, Banc vert CGm : Banc royal, Lambourdes
			Lut. inf.		CGi : Bacs à cérithes géantes, à nummulites
		Yprésien	Cuisien	SS	Sables du Soissonnais
			Sparnacien	FG SA AP	Fausses glaises Sables d'Auteuil Argile plastique
			Montien	MM	Marnes de Meudon
II	Crétacé	Senonien sup.	Campanien	CB	Craie blanche

**Tableau I.1 : Formations géologiques dans la région parisienne
(d'après FILLIAT G., 1981)**

Matériaux exploités	Mode d'exploitation	Lieux principaux	Usages
Loess et limon des plateaux	A ciel ouvert	Villejuif (5 m), Kremlin-Bicêtre, Orly (3 m), Montmorency	"Terre à four"; briques réfractaires
Alluvions anciennes (sable, gravier, cailloux)	A ciel ouvert, par dragues	12e Bercy (12 m), 15e (Grenelle), Boulogne-Billancourt, Gennevilliers, Champigny (8 m), Créteil, Bonneuil, Draveil, Vigneux, Viry-Châtillon, Le Pecq, Cergy, etc.	Agrégats pour mortiers et bétons Ballastage
Meulière de Beauce	A ciel ouvert En souterrain (rarement)	Montmorency, Andilly, Palaiseau, Provins, Rambouillet, Gazeran	Pierre à bâtir Construction ouvrage d'art
Marnes (Aquitaniennes)	En souterrain, ex. : les marnières des Yvelines Recouvrement : 13 à 16 m Hauteur d'exploitation : 3 à 5 m	Guyancourt, Trappes	Amendement des terres
Sables de Fontainebleau	A ciel ouvert En souterrain (très rarement) Exploitation par rameaux, à partir d'un puits, Recouvrement : 8 m Hauteur d'exploitation : 1,50 m Largeur des galeries : 1,50 m sans boisage	Clamart (25 m), Villejuif (10 m), Verrières, Champlan, Etampes, Nemours, Fontenay-aux-Roses	Verrerie Fonderie (moulage sablage) Mortier d'injection
Travertin de Brie	En souterrain (malgré un très faible recouvrement) : 2 à 3 m (Thiais) 1,50 m (Montreuil) Hauteur d'exploitation : 1,80 m (Montreuil) 6 m (Orly) Largeur des galeries : 2 à 4 m Exploitation en rameaux sans règles précises	Orly, Thiais, Montreuil	Caillasses pour édification de clôtures, empiérement
Glaize verte	A ciel ouvert	Montreuil, Villejuif	Poteries d'assainissement briques, tuiles
Gypse	A ciel ouvert et en souterrain Toujours par piliers tournés, sauf à Villejuif et Créteil (Mont-Mesly) où existent des exploitations par hagues et bourrage	Paris : Superficie sous-minée : 65 ha 18e, 19e, 20e arrondissements Haute-de-Seine : Superficie : 150 ha Suresnes, Clamart, Châtillon, Fontenay-aux-Roses, Bagneux, Antony Seine-Saint-Denis : Superficie : 480 ha Pantin, Romainville, Noisy-le-Sec, Bagnolet, Montreuil, Neuilly Plaisance, Gagny, Livry-Gargan, Clichy-sous-bois, Vaujours, Villemonble Val-de-Marne : Superficie : 102 ha Villejuif, Vitry-sur-Seine	Plâtre

Tableau I.2 : Mode d'exploitation des principales formations dans la région parisienne
(d'après FILLIAT G., 1981)

Matériaux exploités	Mode d'exploitation	Lieux principaux	Usages
Gypse		Yvelines : Triel, Chanteloup-les-Vignes, Vaux-sur-Seine, Evrecquemont Val d'Oise : Argenteuil, Taverny, Corneilles-en-Parisis	
Calcaire de Champigny	A ciel ouvert	Champigny (5 m), 13 ha	Pierre à bâtir, fabrication de chaux
Calcaire de Saint-Ouen	En souterrain Entrée en cavage Recouvrement maximum : 30 m Piliers tournés Hauteur d'exploitation : 3 à 4 m	Saint-Ouen, Evrecquemont sur 5 ha	Pierre à bâtir
Sable de Beauchamp	A ciel ouvert En souterrain Par galeries en rameaux	Paris (Panthéon), Houilles, Bezons, Suresnes	Fonderie, verrerie, injection
Calcaire grossier	A ciel ouvert et en souterrain Hagues et bourrage : Recouvrement : 1 à 50 m Hauteur d'exploitation : 0,90 m à 3 m Exceptionnellement : 11 m	Paris : Superficie : 770 ha 5e, 6e, 12e, 13e, 14e, 15e, 16e arrondissements Hauts-de-Seine : Superficie : 1004 ha Nanterre, Saint-Cloud, Sèvres, Chaville, Meudon, Clamart, Issy-les-Moulineaux, Châtillon, Malakoff, Montrouge, Bagneux Val-de-Marne : Superficie : 565 ha Gentilly, Kremlin-Bicêtre, Ivry, Vitry, Charenton, Saint-Maur, Maisons-Alfort, Joinville, Saint-Maurice Yvelines : Carrières-sur-Seine, Conflans-Sainte-Honorine, Bougival, Montesson, Houilles, Maisons-Laffite Val d'Oise : L'Isle-Adam, Villiers-Adam-Mériel, Saint-Ouen-l'Aumône	Pierre à bâtir
Argiles sparnaciennes (fausses glaises, argile plastique)	A ciel ouvert et en souterrain (galeries à partir d'un puits, puits peu espacés) En souterrain principalement Recouvrement jusqu'à 45 m (Richebourg) Extraction par défilage au marteau-bêche Galeries : 2,20x2,20x longueur variable du stot, ou galerie circulaire avec extraction par engin mineur-continu, locomoteurs électriques	Paris (Vaugirard, Anteuil), Arcueil, Gentilly Bassin de Provins : Richebourg, La Bretonnière	Briques, tuiles, poteries Argile blanche : sanitaires, faïence, argile brune : produits réfractaires
Craie	En souterrain avec des piliers tournés Recouvrement : maximum 60 m Hauteur d'exploitation 3 m à 15 m Largeur : 4 à 6 m Banc séparatif : 1 à 6 m Exploitations souterraines en forme de bouteille, isolées ou réunies par une galerie à la base	Hauts-de-Seine : Superficie : 20 ha Issy-les-Moulineaux, Meudon Yvelines : Bougival, Louveciennes, La Celle-Saint-Cloud, Port-Marly Département du Nord Inconnues dans la Région parisienne	Entre dans la fabrication des chaux grasses et du ciment blanc de Meudon pour les peintures et mastics Pierre à bâtir

Tableau I.2 : Mode d'exploitation des principales formations dans la région parisienne (suite)
(d'après FILLIAT G., 1981)

Partie I - APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

Pour construire les grands bâtiments, les monuments et les églises à cette époque, on a eu besoin des grandes quantités de pierre de taille.

Trois raisons principales ont conduit l'homme à exploiter en souterrain de la pierre de taille : la mauvaise qualité du matériau exploitable en carrière à ciel ouvert, la faible épaisseur et l'extension limitée des affleurements de bonne pierre, et leur éloignement par rapport aux grandes villes. Pour cela, il creusa le plus souvent à flanc de coteau, des carrières souterraines souvent très étendues.

Avant le XVIII^e et surtout la fin du XIX^e siècles, l'exploitation était anarchique. A la fin du XIX^e siècle l'exploitation fut réglementée. L'exploitation se fait par la méthode dite des chambres et piliers abandonnés. Cette exploitation a longtemps été manuelle avant de connaître une certaine mécanisation dans la deuxième moitié du siècle dernier.

Dans cette région du Sud-Ouest de la France, les carrières souterraines représentent environ 20 km² réparties sur 120 communes, en zone urbaine ou périurbaine, posent un problème de sécurité majeur vis-à-vis des biens et des personnes (RODE N., 1989 [34]). La plupart de ces carrières se localisent essentiellement dans l'Entre-Deux-Mers, plateau situé entre les vallées de la Garonne au Sud et à l'Ouest et la Dordogne au Nord, ainsi que sur la rive droite de ce fleuve. Ces secteurs correspondent à une position affleurante ou subaffleurante de la formation oligocène dite du calcaire à Astéries. Le relief de cette région est dans l'ensemble peu contrasté. Ceci est en accord avec la faible intensité de ses caractères structuraux.

1.3. Les carrières souterraines du Nord

L'existence des carrières souterraines de calcaire dans le département du Nord (et dans celui du Nord-Pas-de-Calais) remonte effectivement à des temps fort anciens (BIVERT B., 1988 [2]). D'après de vieux manuscrits l'exploitation aurait commencé dans la commune de Lézennes vers l'an 600. Il y a quelques siècles, l'exploitation des carrières a dû être fort importante dans le département.

D'une part, elle a fourni la pierre à bâtir nécessaire à la construction des villes. D'autre part, quand l'emploi du calcaire pour la construction fut progressivement abandonné de très nombreuses carrières souterraines furent exploitées, notamment au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle pour la fabrication de la chaux. L'exemple le plus frappant que nous possédons est celui d'un four à chaux de la région de Valenciennes qui a fonctionné jusqu'en 1962, alimenté par la craie blanche de son sous-sol.

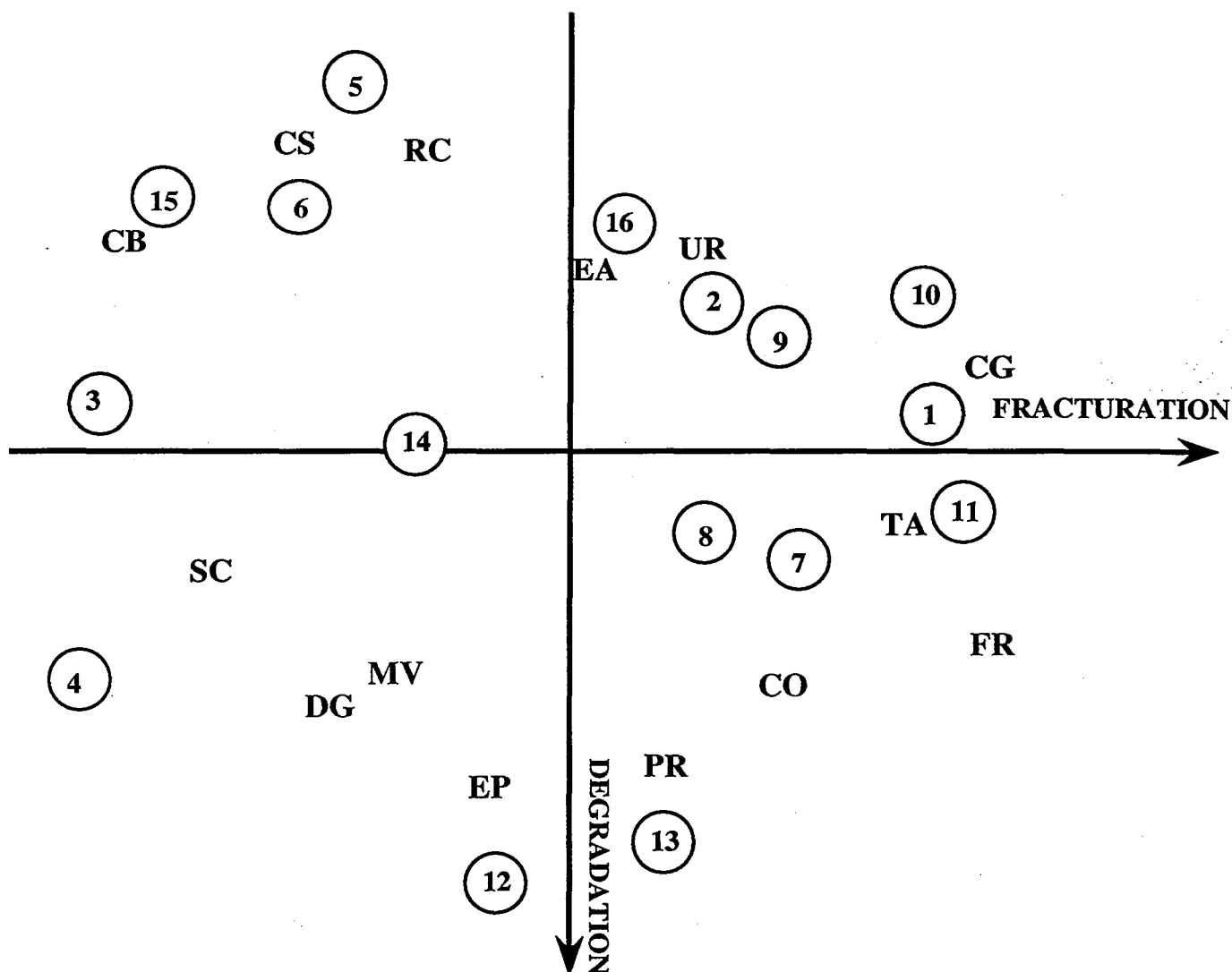
Une enquête dans les régions de Valenciennes et de Cambrai d'une part et dans la banlieue Sud de Lille d'autre part, a révélé que le nombre et l'étendue des carrières souterraines autour des anciennes agglomérations sont certainement considérables. Il est très possible que l'ensemble des carrières du département du Nord couvre une superficie globale de l'ordre de 10 à 20 km² (BIVERT B., 1988 [2]).

Dans les seuls arrondissements de Cambrai et de Valenciennes, on a trouvé la trace d'environ 60 anciennes carrières réparties sur plus de 25 communes; en particulier, des carrières très importantes ont miné le sous-sol des territoires des communes de Cambrai, Valenciennes, Anzin, Marly, Masnieres, Saint-Saulve, Hordain, Rombies, Petite-Forêt, Avesnes-le-sec, etc....

Dans la banlieue Sud de Lille, toute une zone d'une dizaine de kilomètres de longueur, s'étendant sur les communes d'Hellemmes, Lezennes, Ronchin, Lesquin, Faches-Thumesnil, Wattignies, Loos et Maubourdin a fait l'objet d'une exploitation intensive. On retrouve même d'anciennes carrières jusque sous la ville de Lille (Faubourg des postes) et, plus au Sud à Seclin et Pont-à-Marcq.

N°	Site	Craie	Profondeur (m)	Eau	Fracturation naturelle	Taux (%)	Section piliers (m2)	Urbanisation	Rc saturée (MPa)	Dégradation active	Mouvements
101	Hordain RN 29	Grise	15	non	lâche	78	4	oui	32	non	faibles
102	Cambrai	Grise	13	oui	lâche	50	15	oui	43	non	faibles
103	Marly	Blanche	16	non	dense	65	30	oui	51	oui	moyens
104	Saint-Saulve	Blanche	17	non	dense	55	20	non	36	oui	très forts
105	Lezennes P 16	Blanche	8	oui	dense	76	10	non	54	non	nuls
106	Lezennes-Chicons	Blanche	8	non	dense	72	13	non	55	non	nuls
107	Hordain-Simca	Grise	10	non	lâche	75	4	non	38	oui	moyens
108	Estreux	Grise	18	non	moyenne	85	3	non	53	oui	moyens
109	Valenciennes Glacis	Grise	12	oui	moyenne	70	15	oui	29	non	faibles
110	Malicourt	Grise	13	non	lâche	80	4	oui	48	non	nuls
111	Villers-Outreaux	Grise	26	non	lâche		3	oui	45	non	faibles
201	Rohecorbon	Tuffeau	35	non	lâche	70	30	non	26	oui	moyens
201 bis	Rohecor. rouge	Tuffeau	30	non	lâche	82	16	non	26	oui	forts
202	Crouzilles	Tuffeau	19	oui	moyenne	71	7	oui	65	oui	très forts
301	Lille-Océanie	Blanche	5	non	dense	55	15	oui	50	oui	faibles
302	Lezennes Pasteur	Blanche	9	non	dense	79	10	oui	44	non	nuls

Tableau I.3 : Caractéristiques choisies dans les carrières pour l'étude statistique
(d'après SCHWARTZMANN R. et al., 1986)



Variables actives	Individus actifs
EA = Eau	1 = Hordain RN 29
MV = Mouvements	2 = Cambrai
DG = Dégradation	3 = Marly
FR = Fracturation	4 = Saint-Saulve
PR = Profondeur	5 = Lezennes Puits 16
TA = Taux de défruitement	6 = Lezennes Chicons
SC = Section des piliers	7 = Hordain Simca
CB = Craie blanche	8 = Estreux
CG = Craie grise	9 = Valenciennes Glacis
UR = Urbanisation	10 = Malincourt
RC = Résistance mécanique	11 = Villers-Outreaux
EP = Effort sur les piliers	12 = Rochemorbon
CO = Contrainte verticale	13 = Idem, zone rouge
CS = Coefficient de sécurité	14 = Crouzilles
	15 = Lille Océanie
	16 = Lezennes Pasteur

Figure I.2 : Résultats de l'analyse en composantes principales
(d'après SCHWARTZMANN R. et al., 1986)

Partie I - APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

D'un point de vue géologique, le Nord de la France est constitué en sous-sol par la craie turonienne et sénonienne. C'est dans le crétacé qu'on rencontre cette formation crayeuse.

La craie a pour constituant de base le carbonate de calcium CaCO_3 , en proportion le plus souvent supérieure à 90 %. Cette roche est demeurée pendant fort longtemps la seule pierre à bâtir pour une bonne partie du Nord de la France. Elle a servi en particulier à la construction des grandes villes de la région que sont Lille, Douai, Arras, Cambrai et Valenciennes, comme en témoignent les vieux édifices qui y subsistent encore (châteaux, églises, fortifications, etc...).

En liaison avec cette région, une étude statistique a été menée sur une dizaine des carrières (BONVALLET et al, 1978) [6].

Le tableau I.3 rassemble les principales données d'ordre géométrique ou géotechnique qui caractérisent les carrières étudiées.

Une analyse en composantes principales a été conduite sur l'ensemble de ces carrières en mettant en évidence sur le plan principal deux facteurs essentiels :

Le premier axe est caractérisé par la fracturation. Il est lié à la nature de la craie (la craie grise est plus fracturée) et au taux de défrètement (la fracturation est plus intense quand la section est plus petite).

Le deuxième axe est caractérisé par la dégradation. Cette dernière est bien corrélée négativement avec cet axe. Elle s'interprète en liaison avec la profondeur, l'effort sur les piliers, la contrainte verticale et les mouvements. En corrélation positive, on trouve une bonne résistance des terrains et un grand coefficient de sécurité.

La figure I.2 reproduit les résultats de la projection de l'ensemble des individus (carrières) sur le plan des deux premiers axes principaux. Les points figuratifs des facteurs naturels et des variables calculées ont également été placés sur cette figure.

En conclusion, cette étude statistique a mis en évidence deux facteurs principaux qui participent eux aussi à la complexité des carrières souterraines. La fracturation qui peut être naturelle (fractures préexistantes) et/ou mécanique (induite par les carrières). La dégradation qui peut être expliquée selon cette étude par le degré de sollicitation des ouvrages souterrains (profondeur importante, effort considérable et contrainte excessive).

1.4. Les carrières souterraines de Maine-et-Loire

Les carrières souterraines de Maine-et-Loire ont été creusées dans les terrains secondaires et tertiaires de l'Est du département. On les rencontre essentiellement dans : le calcaire à silex du Bajocien (Jurassique), les calcaires crayeux du Turonien (Crétacé) et le calcaire coquillier du Tortonien (Miocène) (MAISONNEUVE E., 1987 [177]).

Ce département compte environ 150 communes possédant un sous-sol reconnu exploité. Il existe en effet de très anciennes excavations tombées dans l'oubli, n'ayant laissé de traces ni dans les mémoires, ni dans les archives, ni sur le terrain où leurs accès ont disparu, obturés depuis longtemps.

La présence de telles cavités ne se révèle alors qu'à la faveur de leur mise au jour accidentelle : par des travaux qui les recoupent, ou bien par apparition de désordres du sol trahissant leur dégradation (affaissements, fontis et effondrements).

Le nombre des cas documentés dans ce département est limité, pour cette raison, nous avons les associés avec les carrières de la région du Nord dans notre base de données.

2. DEGATS ET ACCIDENTS

Les carrières souterraines se trouvaient, à l'origine, en pleine campagne, autour des villes; la plupart y sont encore, mais avec le développement de l'urbanisme, les agglomérations s'agrandissent et depuis quelques dizaines d'années, on a construit et on continue à construire, souvent sans le savoir, sur des zones sous-minées par les anciennes carrières : la probabilité d'accident devient de ce fait de plus en plus grande. D'autre part, la construction d'ouvrages et de bâtiments entraîne un certain affouillement du sol qui diminue l'épaisseur de la couche superficielle de terre et d'argile; le calcaire n'étant plus aussi bien protégé contre les infiltrations d'eau, les anciennes galeries souterraines qui avaient résisté sans dommage pendant un ou plusieurs siècles peuvent ensuite s'effondrer en quelques années.

Les effondrements d'anciennes carrières souterraines peuvent se manifester sous différentes formes. Dans les carrières exploitées par galeries et piliers abandonnés le type d'éboulement le plus fréquent est celui du "fontis". Il s'agit, comme cela a été dit dans l'introduction, d'un éboulement progressif du toit, (figure I.3a) en général au croisement de deux galeries ou lorsqu'on dépasse une portée limite. L'éboulement commence par faire une cloche dont la hauteur augmente au fur et à mesure des éboulements successifs se développent jusqu'à ce que le toit atteigne brusquement la surface du sol, créant une ouverture de plusieurs mètres de diamètre (figure I.3b).

Lorsque des constructions se trouvent à l'aplomb des voûtes, la création du fontis entraîne de graves désordres. Mais il peut arriver aussi que ce soient les piliers qui s'écrasent à la longue; la roche exploitée est en effet, dans certains cas, très tendre, assez friable, ayant tendance à se déliter (les piliers "s'usent" progressivement); le phénomène est souvent accéléré par des infiltrations d'eau. Il arrive un moment où toute la carrière s'effondre (figure I.4a). La présence d'une couche argileuse ou marneuse au niveau du mur de la carrière favorise le poinçonnement des piliers dans cette dernière et par conséquent peut provoquer un effondrement généralisé (figure I.4b).

Ces mécanismes complexes de rupture des ouvrages souterrains ont causé des graves accidents dans la région parisienne et le Nord : 26 tués et 8 blessés dans la carrière de Vieux Ports, 13 tués et 5 blessés dans la carrière de Chancelade, 3 tués dans la carrière de Pantin et 2 tués dans la carrière de la Fourchette (voir tableau I.4). Les tableaux I.5 & I.6 illustrent d'autres accidents dans la région de Gironde et Maine-et-Loire. L'observation de ces tableaux fait apparaître deux facteurs essentiels, responsables de tels accidents : un facteur interne qui peut être représenté par une exploitation intensive sans aucune règle et un facteur externe qui est essentiellement la présence d'eau dans les carrières.

3. METHODES DE CALCUL APPLIQUEES POUR L'EVALUATION DE LA STABILITE

Le diagnostic de stabilité d'une carrière souterraine et sa surveillance reposent sur diverses méthodes d'observations et de mesures, désormais bien maîtrisées (mesures de déformations, de contraintes, auscultation ultrasonique, méthodes géophysiques diverses etc....

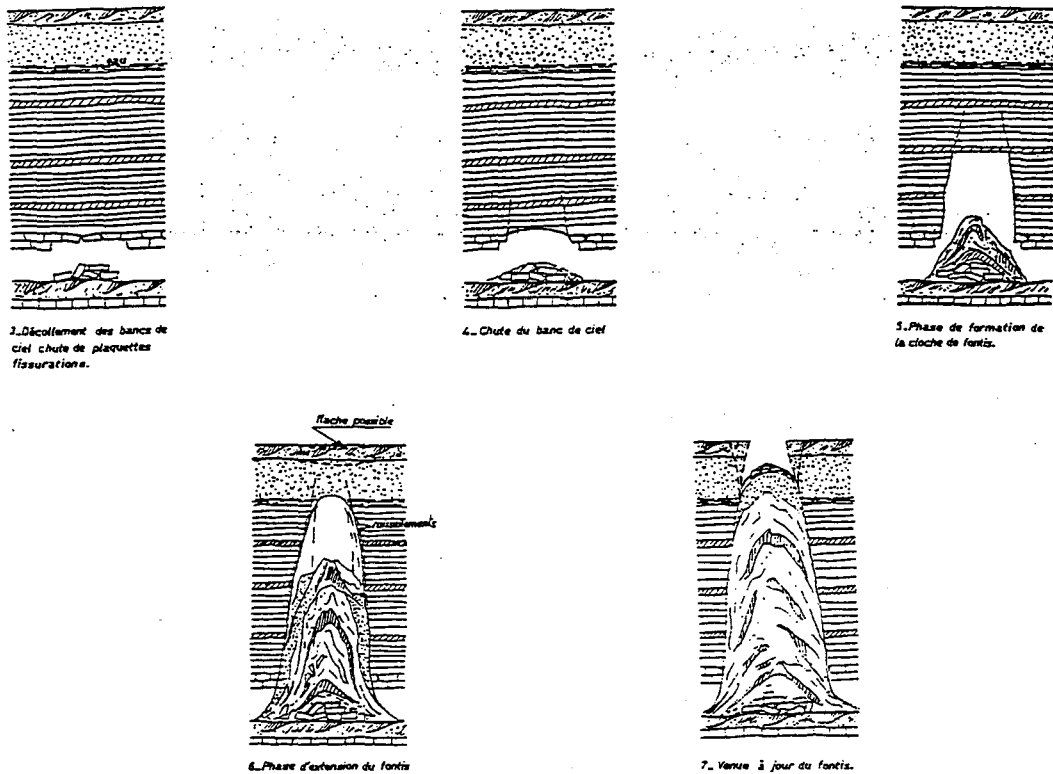
Ces méthodes sont applicables a priori à tous les types de carrières complexes ou non. En revanche le calcul des sollicitations pour évaluer les conditions de stabilité est susceptible d'être difficile dans les carrières complexes. C'est pourquoi, pour ce travail on ne parle que des méthodes de calcul : les méthodes de calcul analytiques les plus connues et les méthodes de calcul numériques.

3.1. Méthodes analytiques

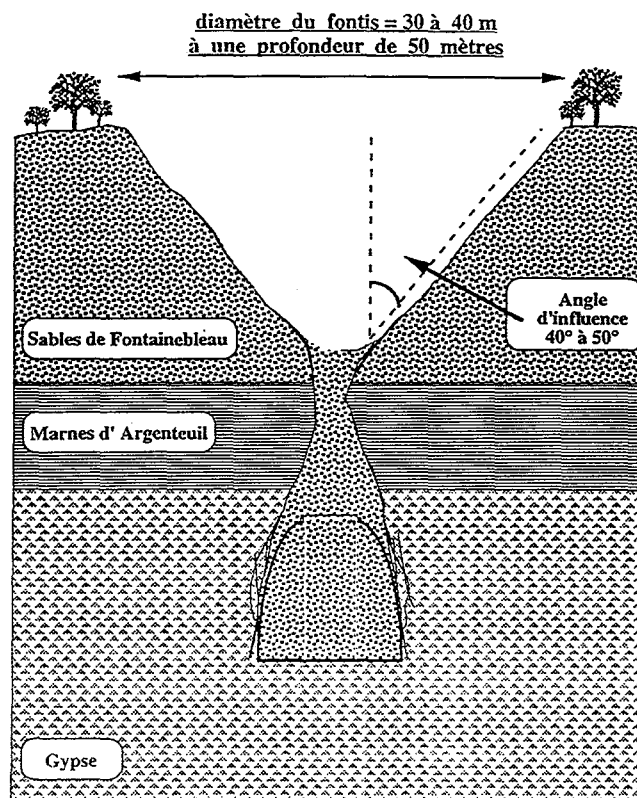
3.1.1. Analyse de la stabilité des piliers

L'analyse de la stabilité des piliers est fondée sur la théorie de l'aire tributaire qui est bien adaptée aux carrières souterraines exploitées par la méthode des chambres et piliers abandonnés et situées à faible profondeur (figure I.5).

Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE

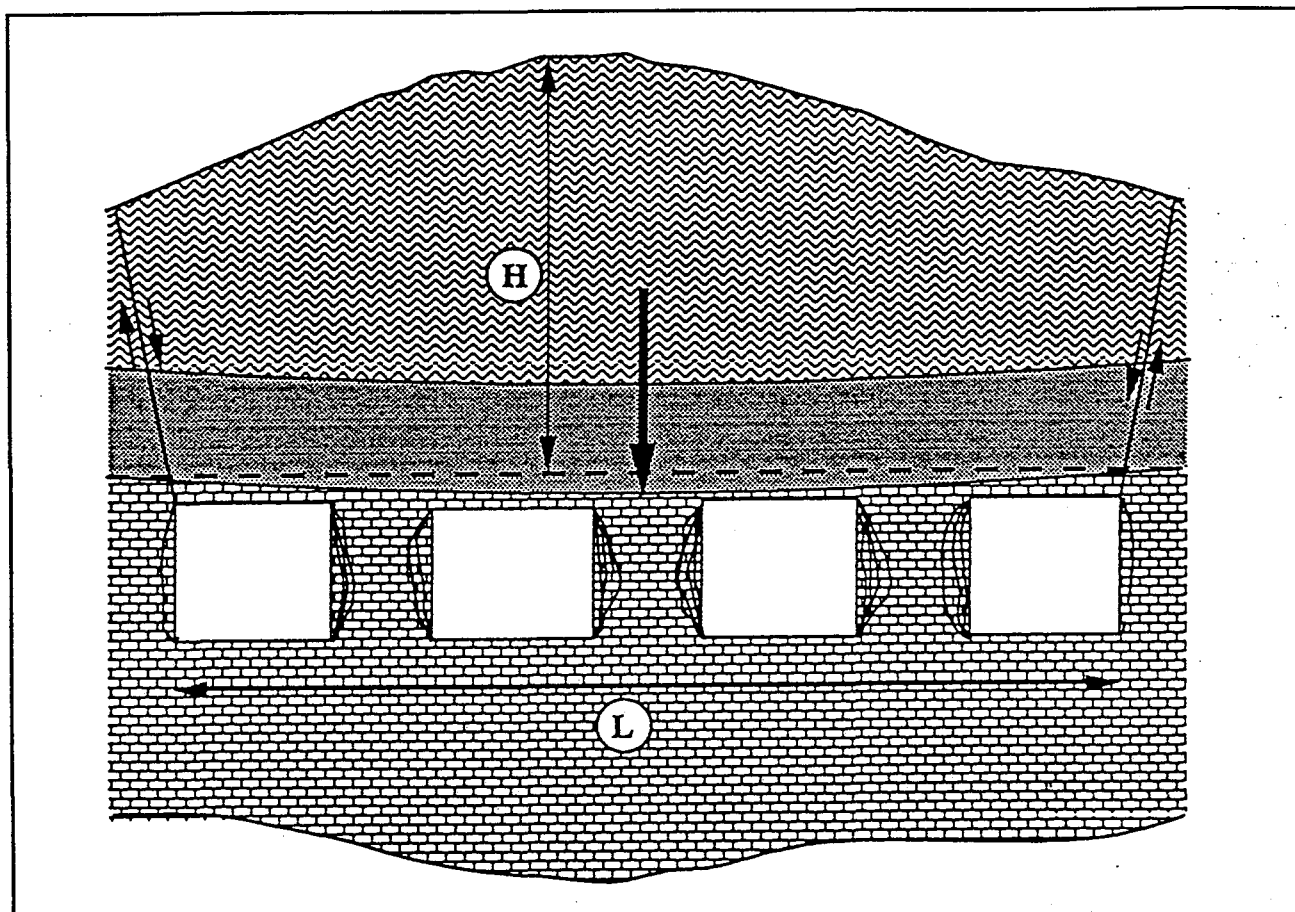


a : Processus de formation de fontis dans les carrières de calcaire grossier (d'après VACHAT J. C., 1982).

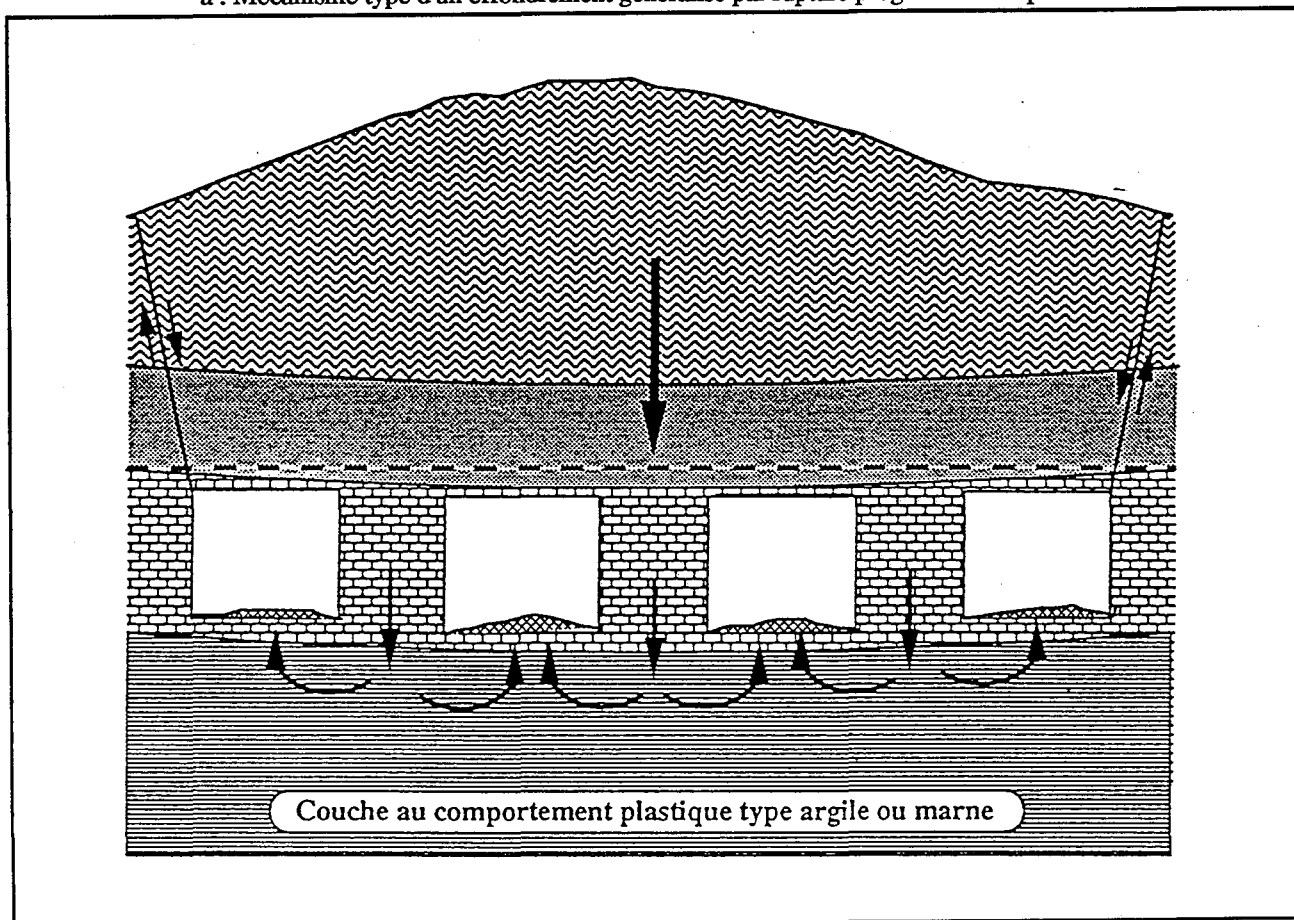


b : Evolution d'un fontis dans le gypse de l'Ouest de Paris (JOSIEN J. P., 1995).

Figure I.3 : Mécanisme de rupture par fontis dans des carrières souterraines.



a : Mécanisme type d'un effondrement généralisé par rupture progressive des piliers.



b : Mécanisme type d'un effondrement généralisé par poinçonnement des piliers dans un mur plastique.

Figure I.4 : Mécanismes de rupture généralisée.

Partie I - Aperçu bibliographique

Date	Site	Exploitation	Victimes	Causes invoquées
1871	Songival	craie	0	Piliers imbibés d'eau
1877	"	"	"	"
1883	"	"	"	"
1891	"	"	"	"
1900	Vieux Ports	Pierre à chaux	26t et 8b	Ruptures des piliers
1883	Villaines-La-Garelle	calcaire	0	
1885	Chancelade	"	13t et 5b	Effondrement subit
1892	Mery/oise	"	0	Taux de défruitement élevé
1899	Pantin	Gypse	3t	Toit marneux désagréé par nappes d'eau
1904	La Fourchette	"	2t	Eaux d'infiltration
1904	Gargon	"	0	Faïlle affectant le gisement (infiltration)
1905	St-Jean de Maurienne	"	0	Dimensions des chambres, présence de crevasses, eau
1908	Limons	calcaire	0	défruitement exagéré
1913	Emeville	"	0	Enfoncement des piliers dans les sables du mur, eau
1913	Orsonnette	calcaire	0	
1932	"	"	0	
1937	"	"	0	
1922	Seyssine	Pierre à Cimont	0	Délitement des piliers sous l'action de l'air humide
1926	Pont-du-Château	calcaire	0	Piliers renversés, hauteur atteignant 10 et 12 m
1949	"	"	0	"
1927	Port Marly	Craie	0	
1928	Ivry en Montagne	Gypse	0	Taux de défruitement non respecté

Tableau I.4 : Quelques accidents dans les carrières souterraines en France

(d'après JOSIEN J. P., 1995)

t : tué(s)
b : blessé(s)

Partie I - Aperçu bibliographique

Date	Commune	Lieu-dit	Type d'accident	Conséquences
1875	Bommes	calcaire	1b	Eboulement terre et roche (poche d'argile)
1866	Camblanes	"	1t	Chute de toit dûe à lit d'argile
1881	"	"	0	Effondrement généralisé
1873	Carignan	"	1t et 1b	Chute considérable de terre et poche d'argile
1894	Cenac	"	0	Effondrement des piliers de l'étage inférieur
1897	"	"	0	Effondrement généralisé (piliers trop minces mal repérés)
1954	Dalignac	"	1t	Chute de toit et effondrement
1897	Haux	"	1t	Rupture de toit, vidange poche d'argile de 4 m3
1903	Latresne	"	1t	Chute de toit
1862	Merignas	"	1t	"
1928	La rivière	"	1t	Rupture de toit
1984	"	"	1t et 3b	Effondrement généralisé sur 500 m2
1874	Salignac	"	1b	Faux toit et lit d'argileux, chute de toit
1892	Saint Andre De Cubzac	"	1t	Vidange poche d'argile
1878	Saint Emillion	"	2t	Rupture de toit
1859	Saint Laurent D'arce	"	1b	Chute de toit
1937	"	"	1b	Chute de toit et piliers ammincis
1857	Tauriac	"	0	Effondrement généralisé de la partie centrale
1861	"	"	0	Effondrement généralisé de l'étage supérieur
1951	"	"	0	Fontis en surface, pluies hivernales abondantes
1970	"	"	2t	Chute de toit
1876	Villeneuve de Blaye	"	1t et 1b	Chute de toit

Tableau I.5 : Les accidents dans les carrières souterraines de la Gironde

(d'après RODE N., 1989)

t : tué(s)

b : blessé(s)

Date	Commune	Lieu-dit	Type d'accident	Conséquences
1966	St hilaire - St florent	La rue haute	Eboulement	Ruelle obstruée
"	Parnay	Rue valbrun	"	Hangar écrasé; danger pour 2 maisons et chemin
1967	Saumur	Quartier du fenet	"	1 mort, 1 maison détruite
"	Dampierre	Le gaillardin	"	2 maisons (1 en haut, 1 en bas du coteau) détruites
1968	"	La grue	"	Menace pour 1 maison
1980	Fontaine-millon	La plesse	Effondrements et éboulements	Pas d'accidents ou non connus
1981	Saumur	Nantilly	"	"
1982	Turquant	La vignole	"	"
1983	Saumur	Le petit puy	"	"
1985	Turquant	Château-gaillard	"	"
1988	Montsoreau	Maumenière	"	"
1990	Chace	Square	"	"
1991	Turquant	Château-gaillard	"	"
1992	Blou	RD n° 129	"	"
1993	Vernoil-le-fourrier	RD n° 58	"	"
1994	Doué-la-fontaine	Bourg	"	"
1995	Seiches/Le-loir	Matheflon	"	"

Tableau I.6 : Les accidents dans les carrières souterraines de Maine-et-Loire
(d'après MAISONNEUVE E., 1987)

Partie I - APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

Selon cette théorie, si σ_{v0} est la contrainte verticale initiale (due au poids des terrains) à l'aplomb des piliers et si τ est le taux de défrètement (rapport de la surface des vides à la surface totale de la carrière), les piliers subissent une contrainte verticale σ_{vi} égale à :

$$\sigma_{vi} = \frac{\sigma_{v0}}{1-\tau} = \frac{\gamma \cdot H_r}{1-\tau}$$

où :

H_r hauteur de recouvrement (m),

γ poids volumique de recouvrement (KN/m³).

Les calculs de stabilité globale basés sur la résistance instantanée à la compression simple, aboutissent à un coefficient de sécurité à court terme. A long terme, le coefficient de sécurité est calculé en fonction de la résistance ultime du matériau en terme de fluage. Le coefficient de sécurité F sera donc pris égal au rapport R/S , où R est la charge admissible du matériau et S la charge statique qui lui est appliquée.

La théorie de l'aire tributaire présente toutefois quelques inconvénients :

- elle néglige la présence de bords fermes ou de stots non exploités puisqu'elle considère que l'exploitation est infinie. Elle ne prend donc pas en compte les reports de charge sur ces derniers.
- la hauteur des piliers (élancement) n'est pas prise en compte,
- elle suppose constante et uniforme la contrainte verticale statique et néglige la contrainte horizontale dans les piliers,
- elle n'intègre pas les discontinuités qui affectent le massif rocheux et en particulier les piliers,
- elle ne tient pas compte de la position des piliers par rapport aux bords fermes.

3.1.2. Analyse de la stabilité du toit

a) Toit assimilé à une poutre

Selon la théorie des poutres (TIMOSHENKO S., 1962 [93]), les piliers ne portent pas tout le poids du recouvrement (hypothèse de la théorie de l'aire tributaire). Le toit participe à l'équilibre du système.

Nous étudions alors par ce modèle les contraintes de compression, de traction et de cisaillement provoquées par les moments fléchissants et les efforts tranchants. Dans une configuration comme présentée sur la figure I.6, il est clair, que le moment fléchissant et l'effort tranchant passent par des extremums qui permettent d'évaluer des contraintes maximales en traction et en cisaillement. Ces contraintes sont d'une part liées à la géométrie du toit et surtout à celle de son premier banc (largeur et épaisseur) et d'autre part, au type d'appuis sur lesquels le toit repose.

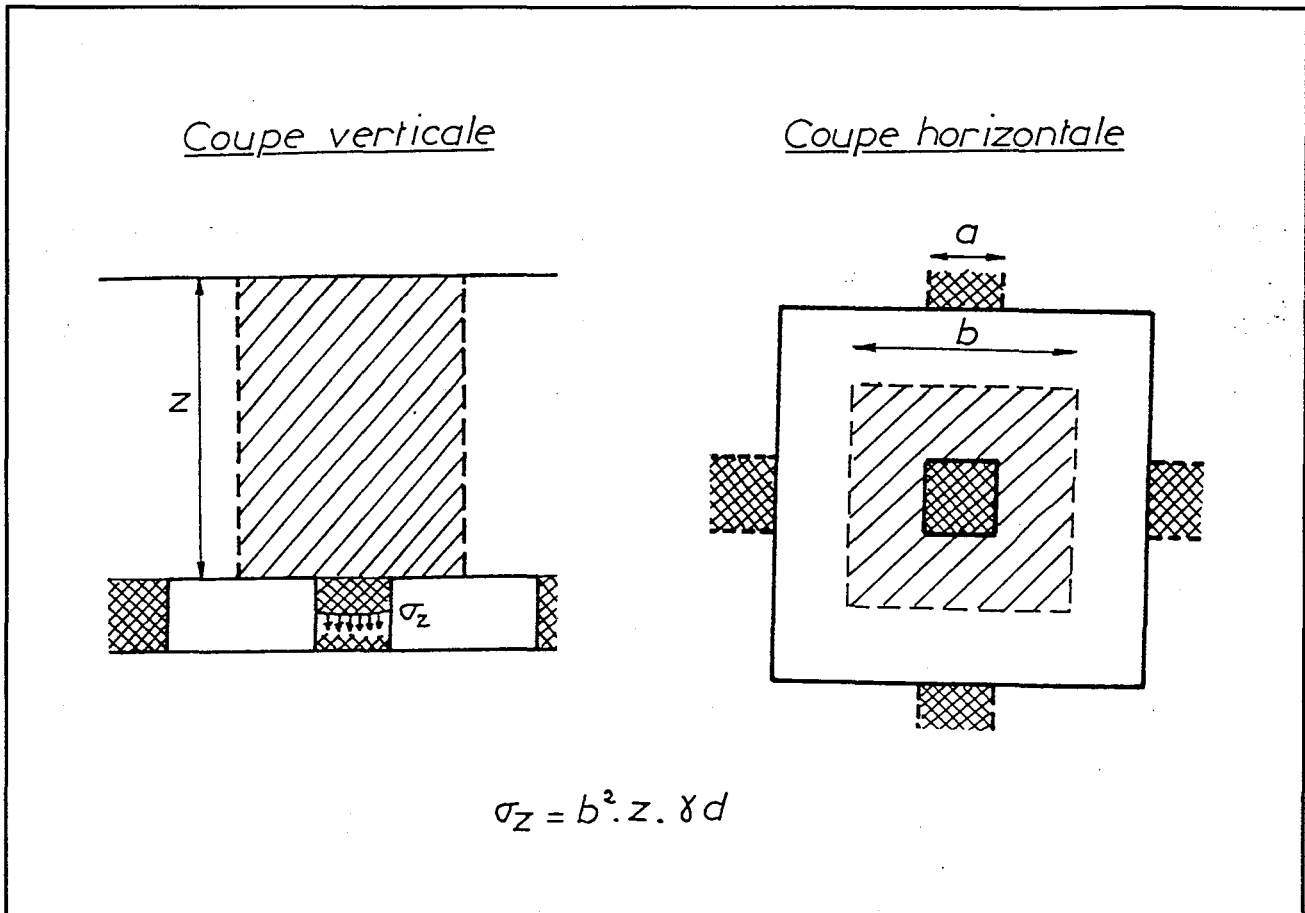


Figure I.5 : Méthode de calcul par l'aire tributaire.

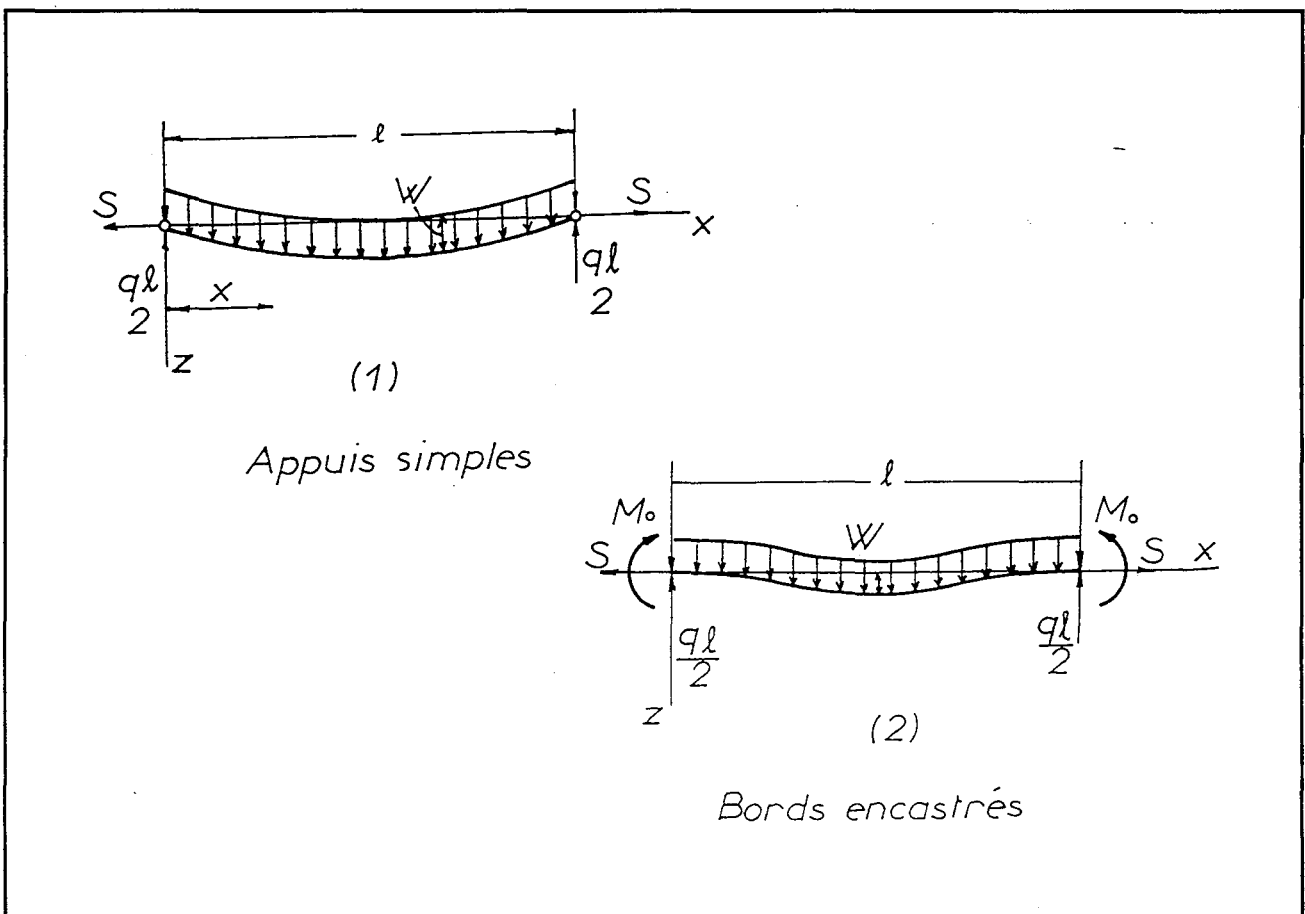


Figure I.6 : Modèle proposé par TIMOSHENKO (d'après TIMOSHENKO S., 1961).

3.1.3. Autres modèles analytiques

Le calcul par modèles analytiques pour des exploitations par chambres et piliers permet de simplifier la tâche et réduire les paramètres de calcul dans le cas des carrières simples. Il offre le plus souvent des résultats satisfaisants en comparaison avec des résultats de mesures. D'autres modèles analytiques ont été utilisés par différents auteurs pour examiner le comportement des piliers et le toit (TIJANI S., 1982 [38]; TINCELIN E., 1982 [39]; TIMOSHENKO S., 1962 [93]).

3.2. Les méthodes numériques

3.2.1. La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis suppose que le massif rocheux est continu. Elle permet de le discrétiser en éléments simples continus (figure I.7). La méthode des éléments finis permet aussi de tenir compte de la géométrie de l'ouvrage, des conditions aux limites et initiales, de l'hétérogénéité et de l'anisotropie des terrains (ARIF I., 1991 [46]; PIGUET J. P., 1983 [78]; OWEN J. et al., 1980 [81]).

A l'heure actuelle, les codes de calcul sont très puissants (CESAR-LCPC par exemple). On peut attribuer aux terrains une loi de comportement élastique ou élasto-plastique ou d'autres. A partir des contraintes et déformations obtenues, cette méthode est capable de localiser globalement les zones les plus sollicitées ou les plus détendues.

Grâce aux moyens informatiques très puissants on peut réaliser des modèles tridimensionnels. La difficulté principale de ces modèles est le temps de calcul qui dépasse parfois une dizaine de jours.

Bien que cette méthode soit très performante en ce qui concerne l'estimation des contraintes autour des ouvrages souterrains, elle ne permet pas la prise en compte des discontinuités naturelles de façon satisfaisante, bien qu'on puisse introduire des éléments particuliers dans ce but (éléments d'interface et éléments joints).

3.2.2. La méthode des éléments distincts

La méthode des éléments distincts est basée sur le principe d'un calcul numérique. Elle est bien adaptée aux massifs rocheux fracturés en blocs (figure I.8). Elle a été développée par CUNDALL (CUNDALL P., 1980 [51]).

Pour tenir compte des discontinuités, il faut introduire d'une part leur géométrie (déterministe et/ou aléatoire) et d'autre part leur comportement (interaction tangentielle ou raideur tangentielle K_s et interaction normale ou raideur normale K_n).

En ce qui concerne les blocs, deux hypothèses sont envisageables : la première consiste à dire que les blocs sont considérés comme rigides, aucune déformation n'est possible au sein des blocs. Ils subissent uniquement un mouvement de translation ou de rotation au cours du temps. La deuxième considère les blocs comme déformables : ils peuvent être discrétisés en éléments continus en faisant appel à la méthode des différences finies pour résoudre le système.

Le calcul est basé sur la seconde loi de Newton qui permet de déterminer le mouvement de chaque bloc en fonction de la résultante des forces qui agissent sur lui.

ITASCA (ITASCA, 1991, 1992 et 1993 [67] & [68]) a développé deux logiciels UDEC (Universal Distinct Element Code) et 3DEC (Three Distinct Element Code) qui sont bien adaptés aux milieux fracturés en blocs. Le premier est conçu pour une modélisation bidimensionnelle. Le deuxième permet de réaliser des modèles tridimensionnels.

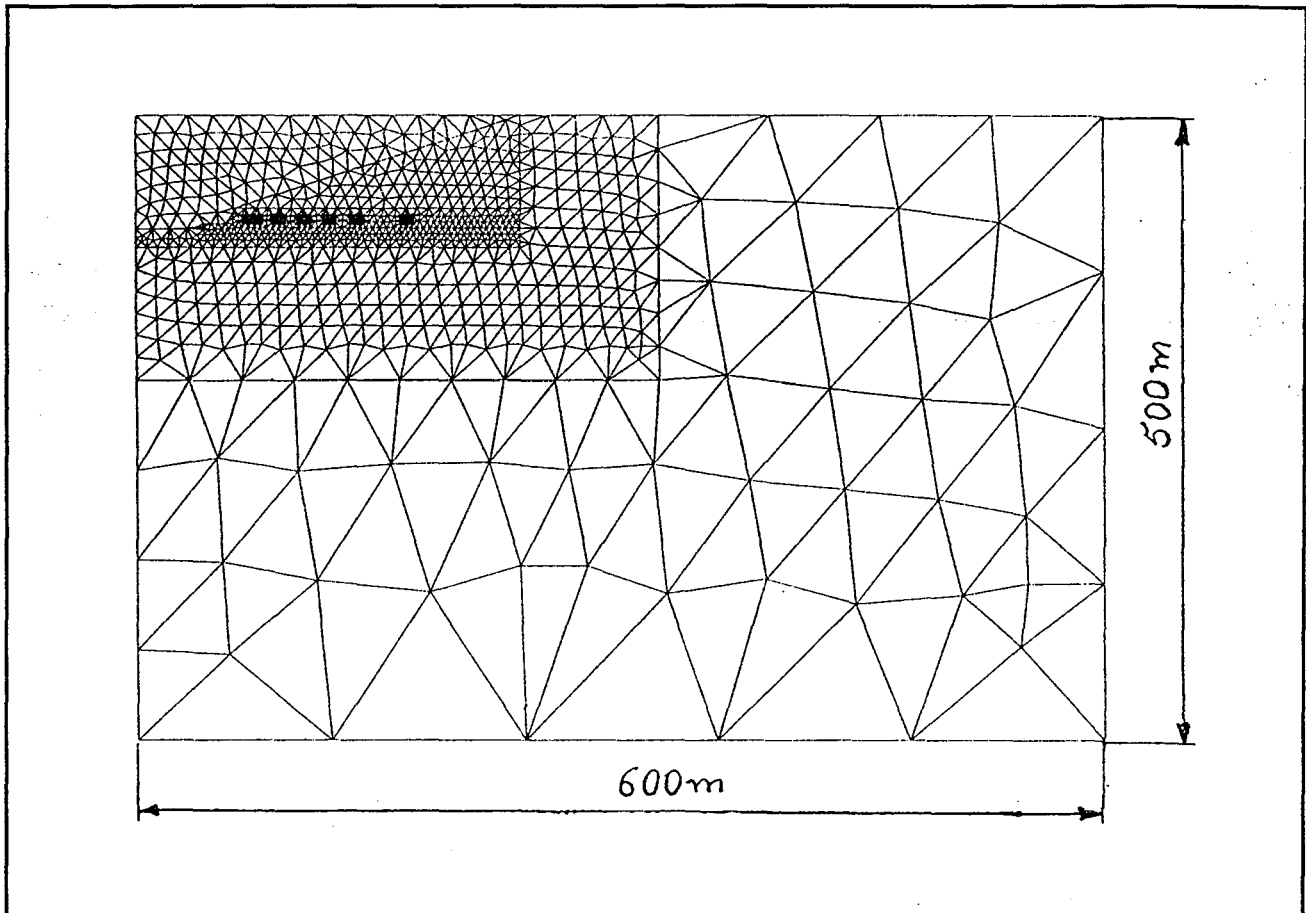


Figure I.7 : Modèle par éléments finis.

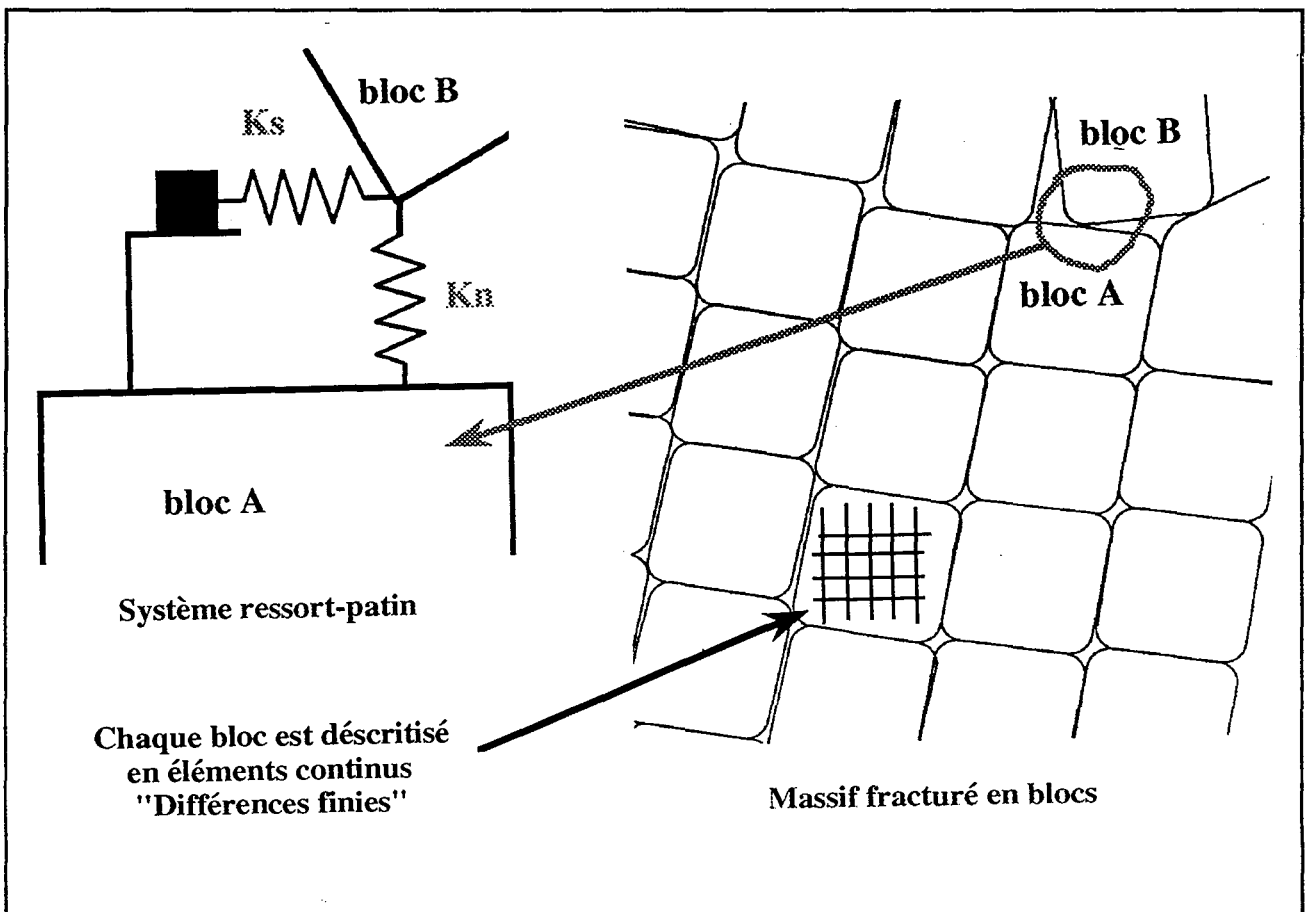


Figure I.8 : Modèle par éléments distincts.

3.2.3. Les méthodes à l'équilibre limite

Il existe actuellement deux méthodes basées sur l'analyse de l'équilibre limite de blocs isolés : la méthode d'analyse des blocs clefs (GOODMANN R. E., 1989 [60]) et la méthode vectorielle de WARBURTON (WARBURTON P. M., 1985 et 1988 [97] & [98]).

a) La méthode de GOODMAN & SHI

Proposée par GOODMAN et SHI (GOODMANN R. E., SHI G. H., 1985 [59]), elle permet d'analyser la stabilité de blocs isolés dans un massif fracturé divisé en blocs.

Les principales étapes de l'analyse consistent à définir la géométrie des blocs autour d'un ouvrage souterrain ou à ciel ouvert et par la suite étudier leur comportement mécanique.

Selon cette théorie, les blocs sont rigides, les discontinuités entre blocs sont parfaitement planes, sont connues de façon déterministe; elles ont des extensions infinies et sont regroupées en un nombre fini de familles.

Sur la figure I.9, nous présentons les différents types de blocs rencontrés autour d'une galerie souterraine par l'intermédiaire d'un jeu de fractures.

b) La méthode vectorielle de WARBURTON

WARBURTON (WARBURTON P. M., 1985 [97]) analyse le mouvement des blocs autour des excavations souterraines dans un massif rocheux fracturé, généralement des blocs susceptibles de tomber sous l'effet de leur propre poids.

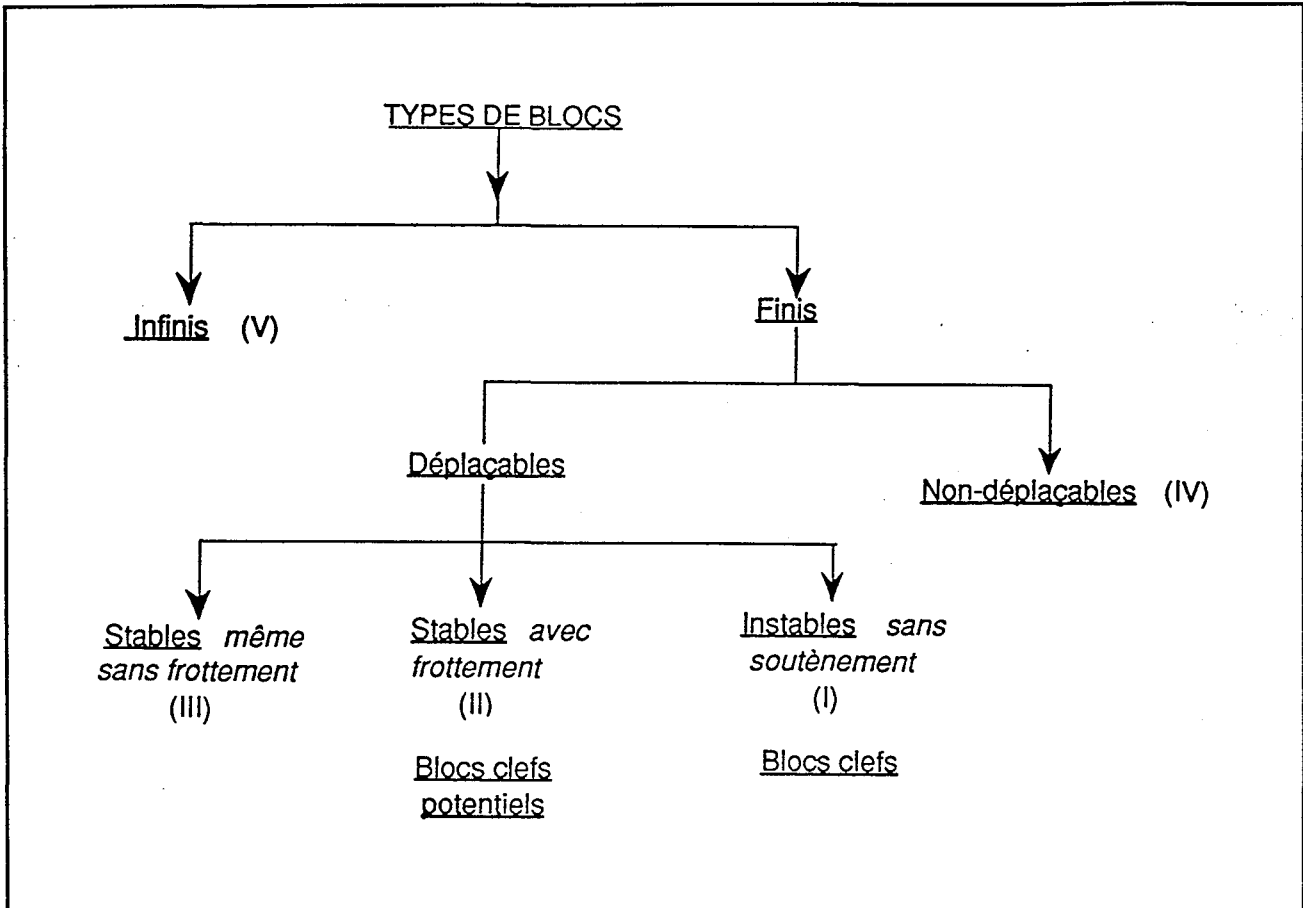
Le principe de la méthode est d'étudier les mouvements de translation des blocs. Chacun de ces blocs est délimité par l'ensemble de ses faces. Les faces sont dites fixées si elles représentent des contacts entre blocs. Les faces en contact avec une excavation sont dites libres.

On symbolise les forces résultantes et motrices agissantes sur le bloc par des vecteurs, on peut aboutir à des équations vectorielles qui permettent de distinguer le mouvement du bloc : soit par une chute libre, soit par un glissement parallèle à une face et soit par un glissement parallèle à deux faces le long d'une arête (glissement dièdre).

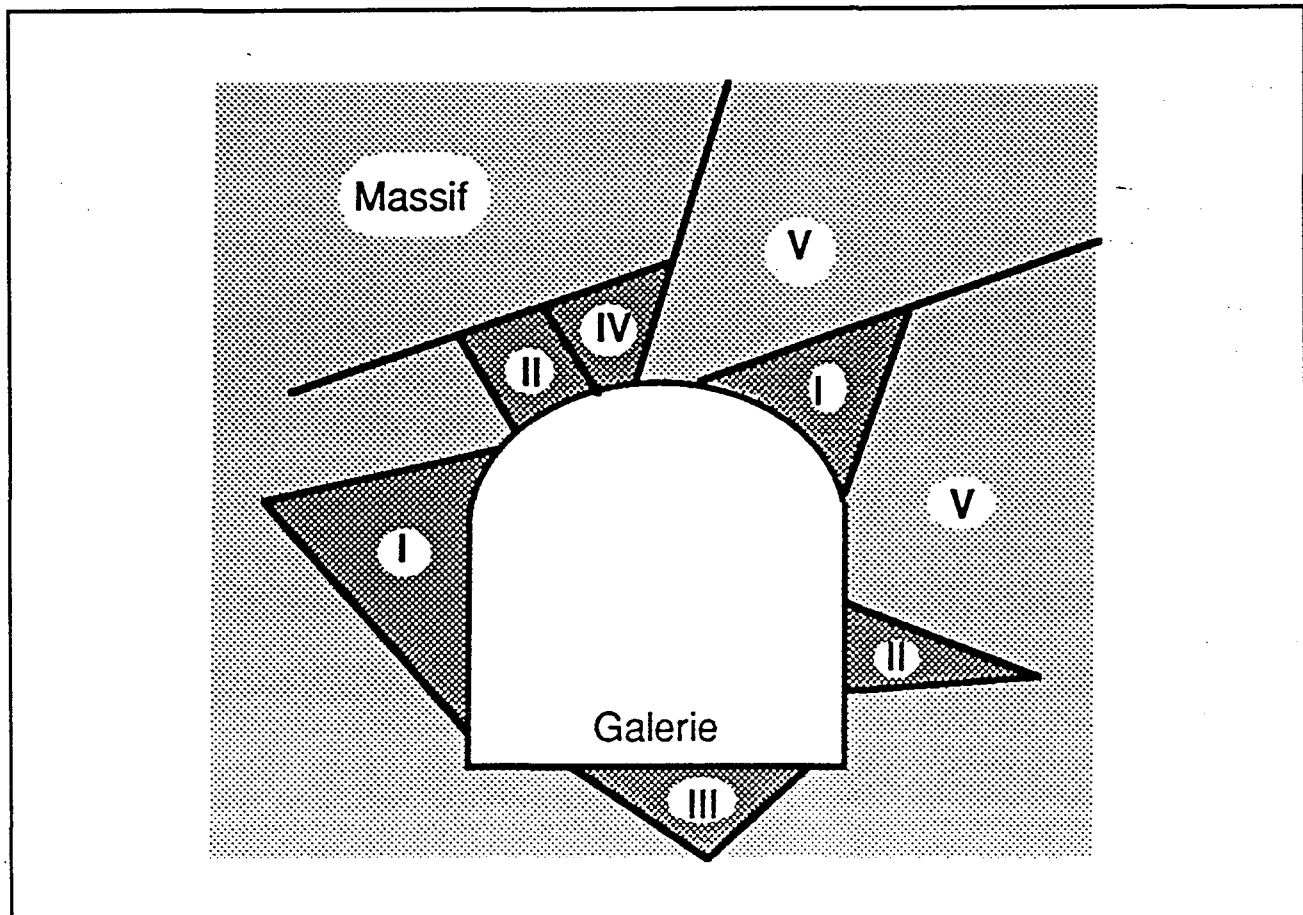
La figure I.10 illustre les principales étapes de l'analyse des blocs polyédriques proposée par WARBURTON.

Pour tenir compte du mouvement de rotation des blocs après un mouvement de translation LIN et FAIRHURST (LIN D. et al., 1987 [72]) ont proposé aussi des équations vectorielles. La figure I.11 montre la possibilité de rotation d'un bloc sur un autre.

Le progiciel RESOBLOK (ASOF M., 1988 et 1991 [44] & [45]; HELIOT D., 1988 [65]) est basé sur ces deux dernières méthodes. Il est constitué d'un ensemble de commandes indépendantes comme le montre la figure I.12.



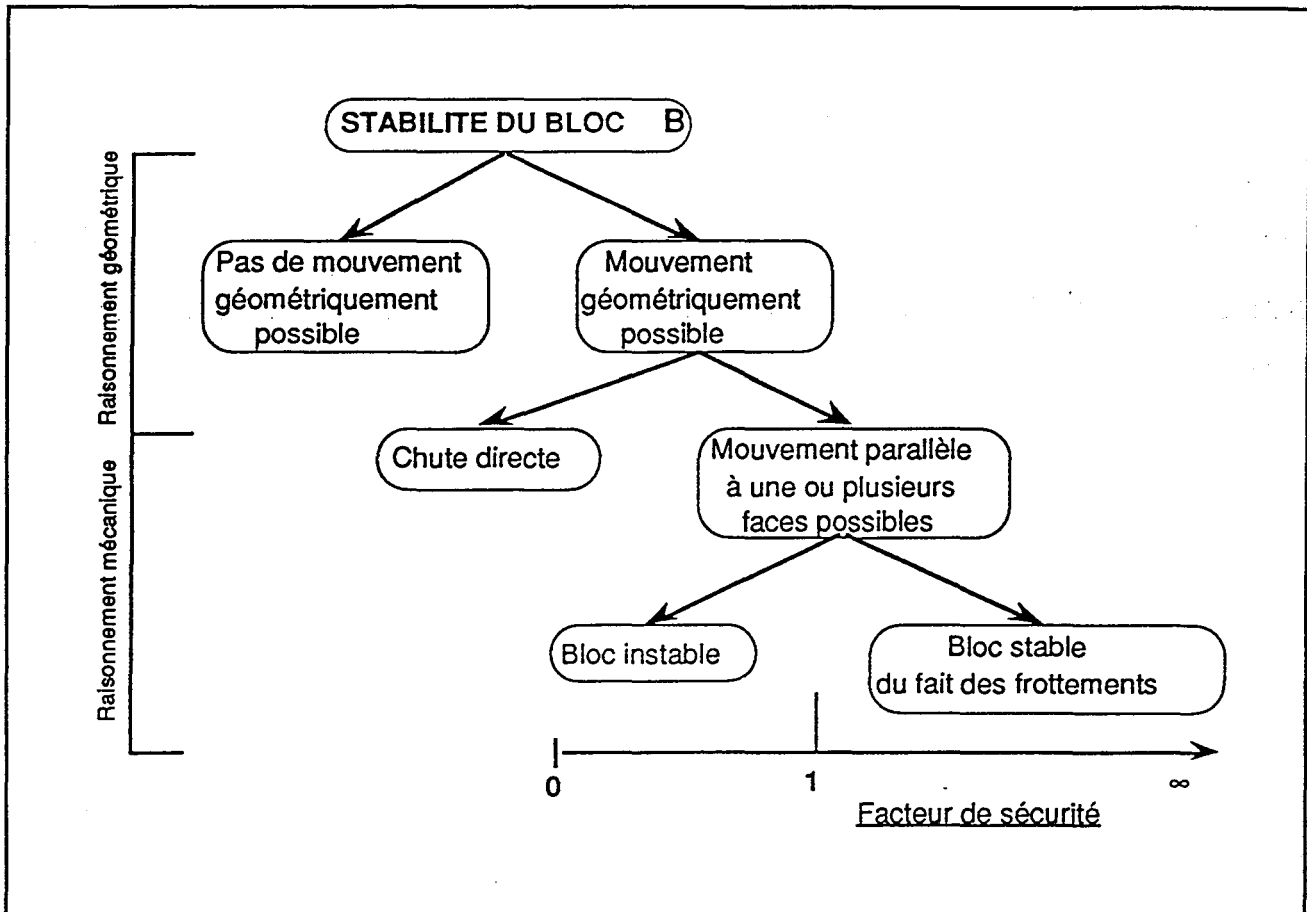
a : Classification des blocs.



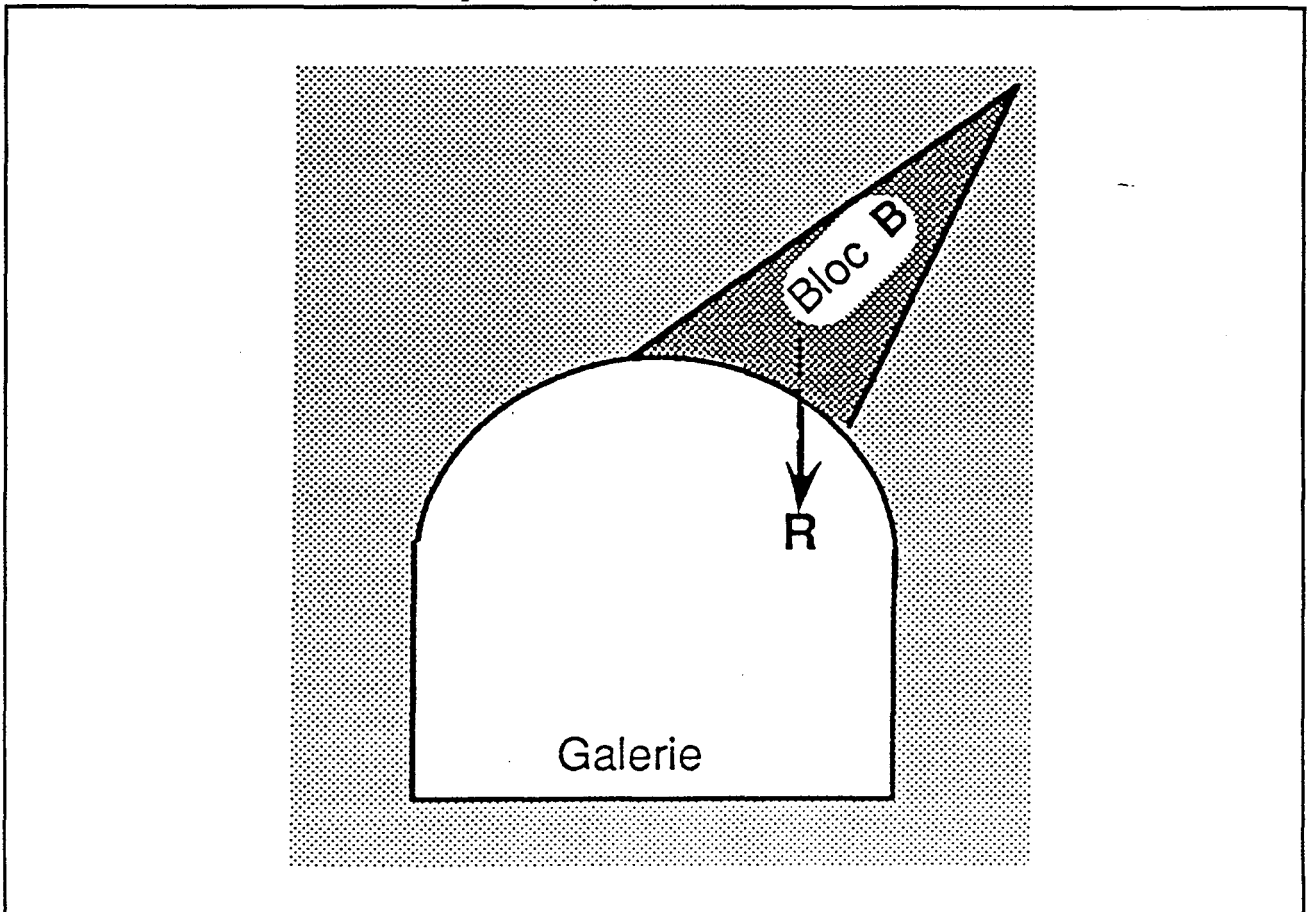
b : Les différents types de blocs.

Figure I.9 : Classification des types de blocs (d'après GOODMAN R. E., 1989).

Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE



a : Les étapes de l'analyse de la stabilité des blocs isolés.



b : Une configuration d'un bloc isolé.

Figure I.10 : Analyse de stabilité des blocs isolés (d'après WARBURTON P. M., 1981).

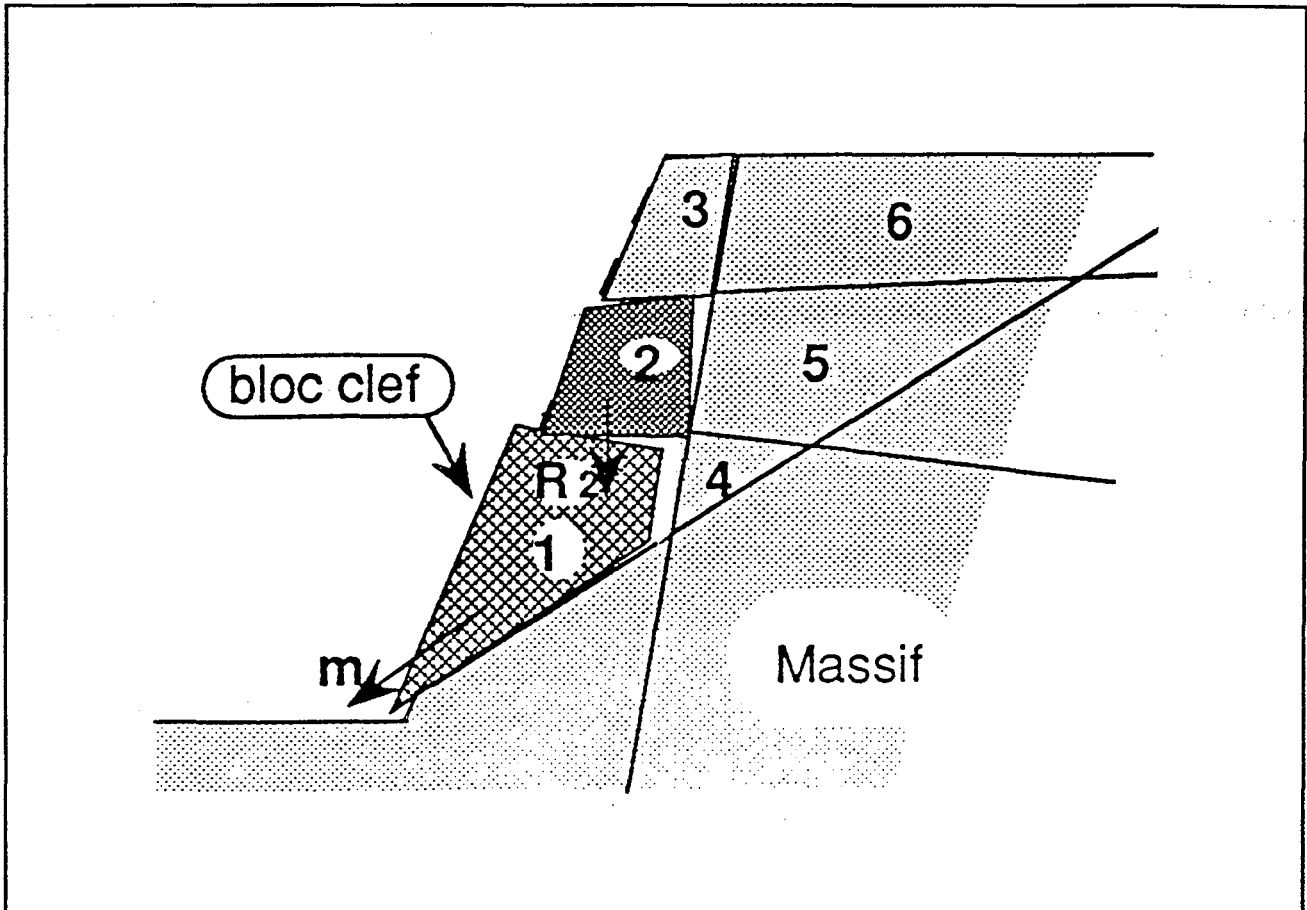


Figure I.11 : Possibilité de rotation des blocs (d'après LIN D., FAIRHURST C., 1988).

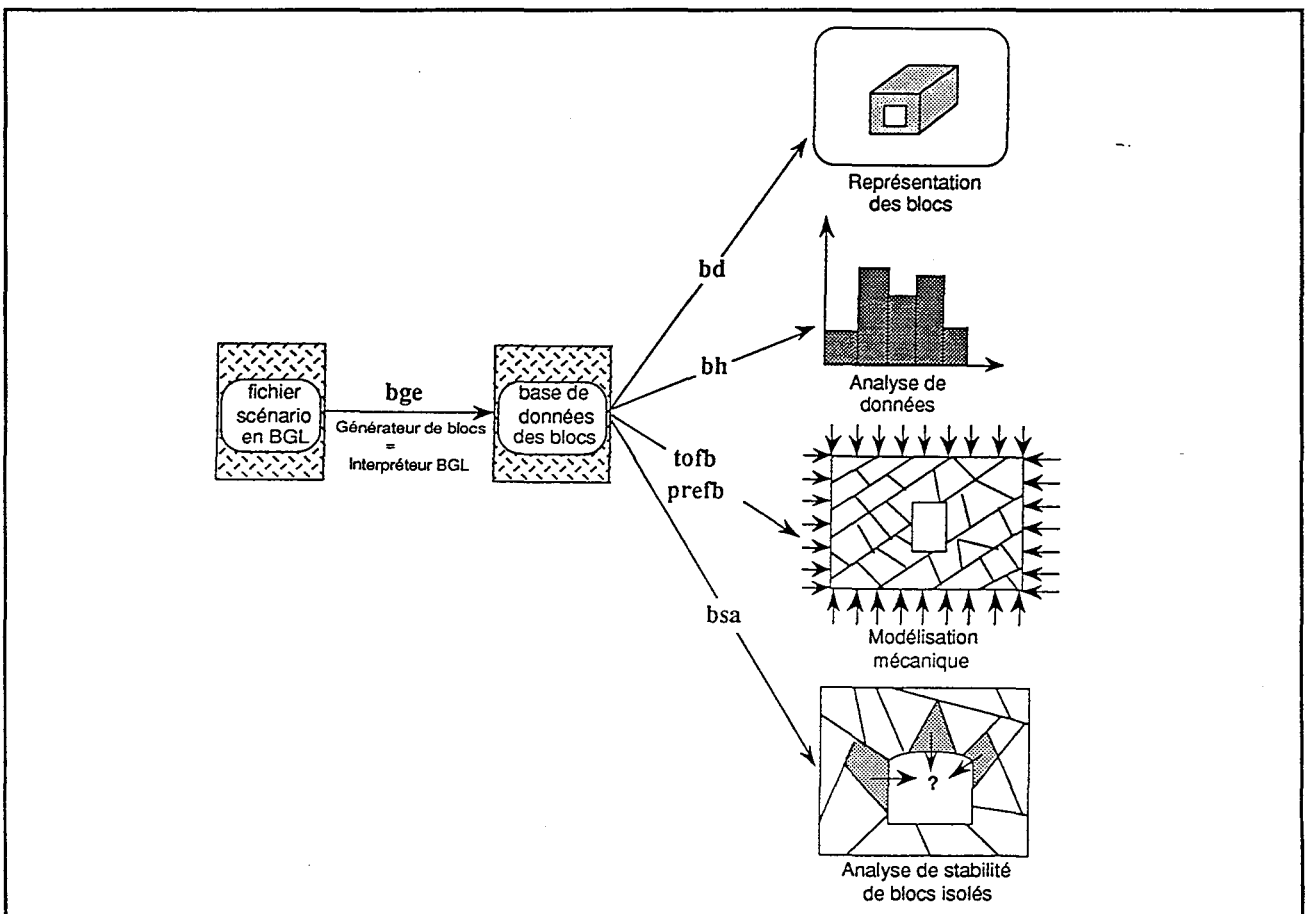


Figure I.12 : Organisation générale du progiciel "RESOBLOK" (d'après ASOF M., 1991).

4. EXEMPLES D'APPLICATIONS DE METHODES NUMERIQUES POUR L'ETUDE DES EXPLOITATIONS PAR CHAMBRES ET PILIERS

4.1. Analyse locale

Suite à un calcul numérique aux éléments finis basé sur l'élasticité linéaire, BONVALLET (BONVALLET J., 1978 [5]) a remarqué que la répartition des contraintes verticales n'est pas la même dans une même section si on considère que le toit est homogène. Elle varie suivant la hauteur du pilier et suivant la largeur. Elle est alors variable avec la section envisagée (figure I.13).

Dans le plan médian du pilier, la contrainte verticale varie légèrement et est égale en moyenne à la contrainte déterminée par le calcul de l'aire tributaire. Par contre, dans la partie supérieure, la contrainte verticale vaut 1.7 fois la valeur obtenue au centre du piliers.

BONVALLET a analysé aussi les effets des discontinuités introduites dans le modèle avec les moyens de calculs de l'époque (méthode des éléments finis avec joints). La figure I.14a illustre trois situations différentes : une diaclase fermée qui borde un des côtés du pilier, une diaclase ouverte dans le même endroit et quatre diaclases par pilier.

La répartition de la contrainte verticale dans ces différentes hypothèses est représentée sur la figure I.14b. La valeur moyenne est de l'ordre de 2 MPa, quelque soit le cas de figure, en revanche la distribution varie dans une large mesure. Les discontinuités provoquent le phénomène de reports de charge.

Cette étude a bien montré l'effet des discontinuités naturelles et/ou induites sur la répartition des contraintes au sein d'un pilier donné. Mais, compte tenu des hypothèses retenues pour le calcul, on ne peut pas voir la répartition globale des contraintes sur un ensemble de piliers et chambres en même temps.

4.2. Analyse globale

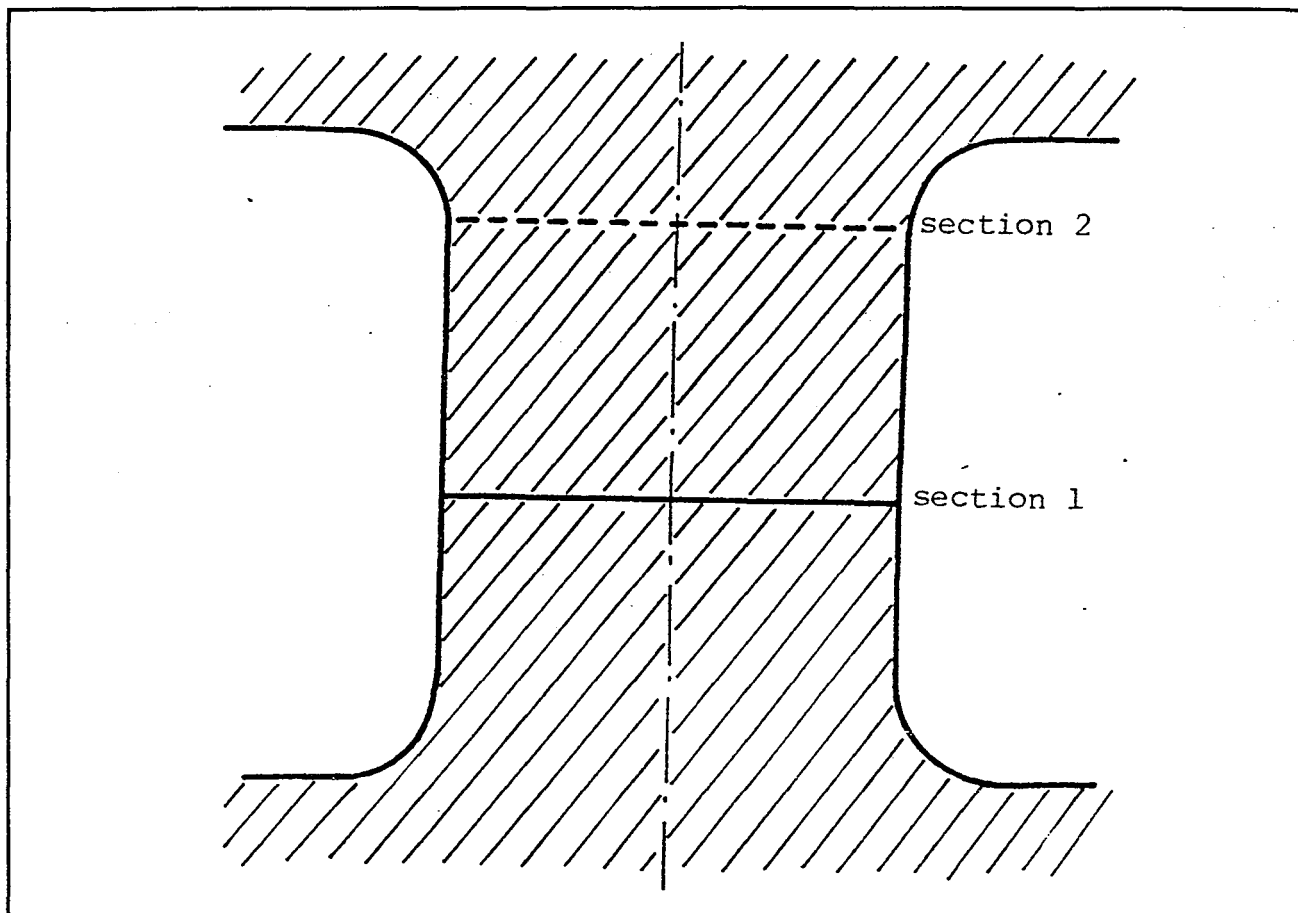
a) Contraintes dans les piliers

GHOUREYCHI (GHOUREYCHI M., 1983 [19]) a mené des calculs en deux et en trois dimensions. Il s'est intéressé au cas des carrières souterraines à faible profondeur où un grand nombre des piliers est en état de post-rupture.

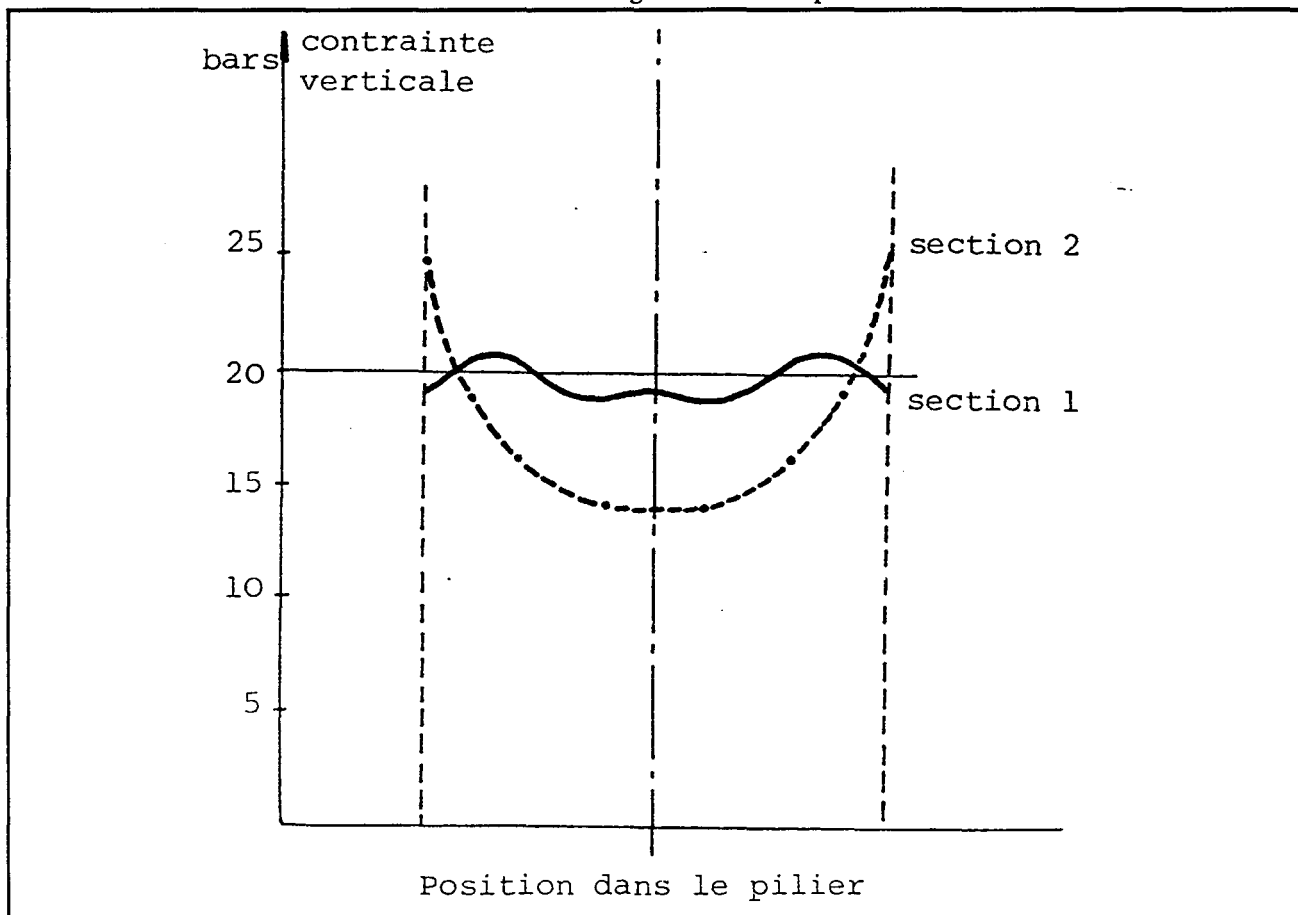
Pour les piliers considérés comme sains, la loi de comportement est une loi élastique linéaire caractérisée par un module élastique et un coefficient de Poisson identiques à ceux de la roche saine du coeur des piliers. Les contraintes calculées sont ensuite comparées à un critère de rupture assimilé à une parabole tangente aux cercles de traction et de compression.

Quant aux piliers altérés et fissurés, on considère qu'ils se trouvent dans un état de ruine très avancé, caractérisé par un comportement élasto-plastique avec radoucissement et plasticité résiduelle. Pour résoudre un tel problème, la solution la plus simple à cette époque a consisté à choisir un modèle équivalent en élasto-plasticité parfaite caractérisé par un module élastique équivalent et un seuil plastique.

Une simple comparaison entre les deux courbes représentées sur la figure I.15 met en évidence que les contraintes verticales dans les piliers sains d'une exploitation très large sont sensiblement plus importantes que celles d'une exploitation ayant une largeur limitée. La contrainte augmente aussi si les piliers voisins sont de plus en plus fracturés.



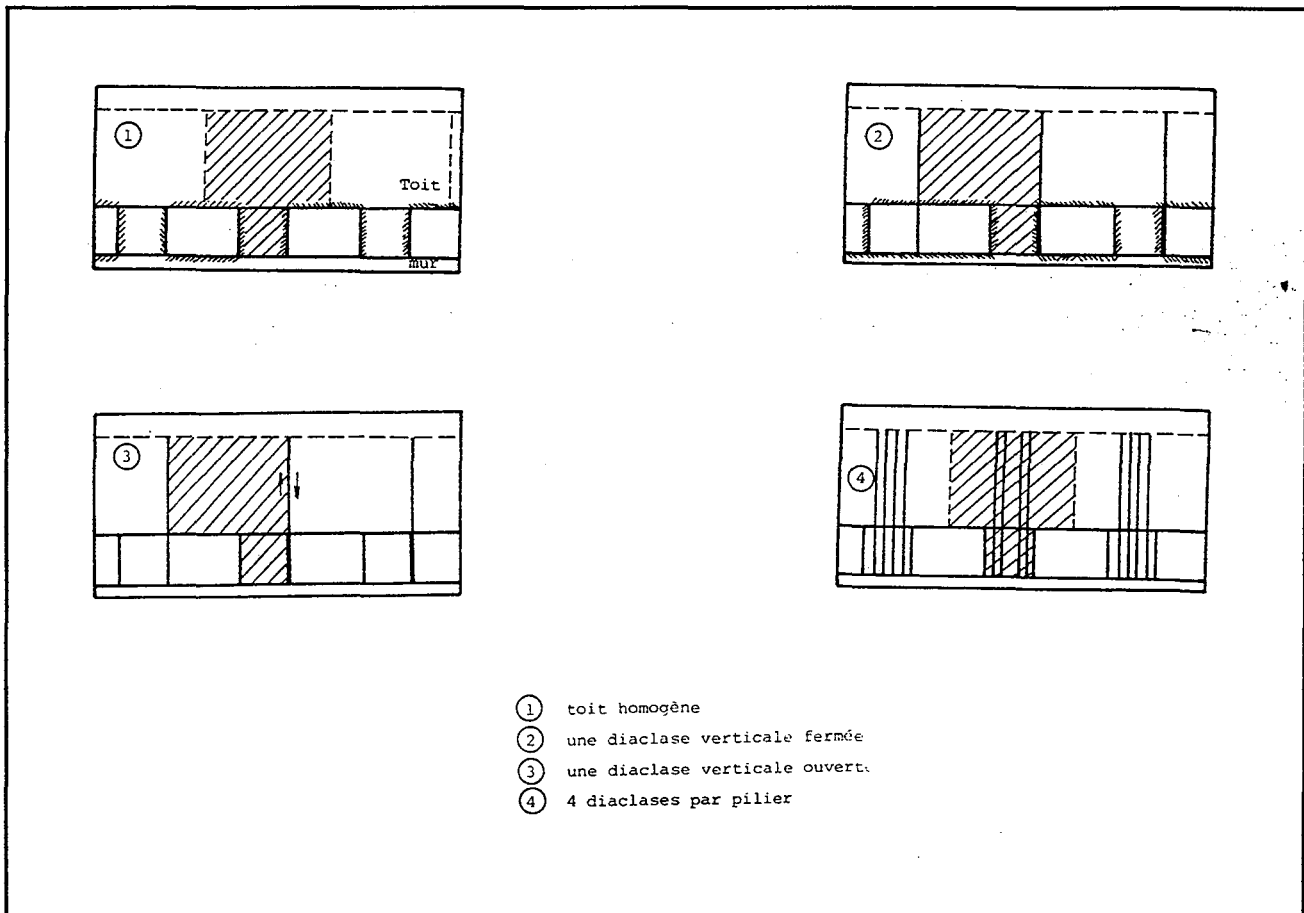
a : Sections envisagées au sein d'un pilier.



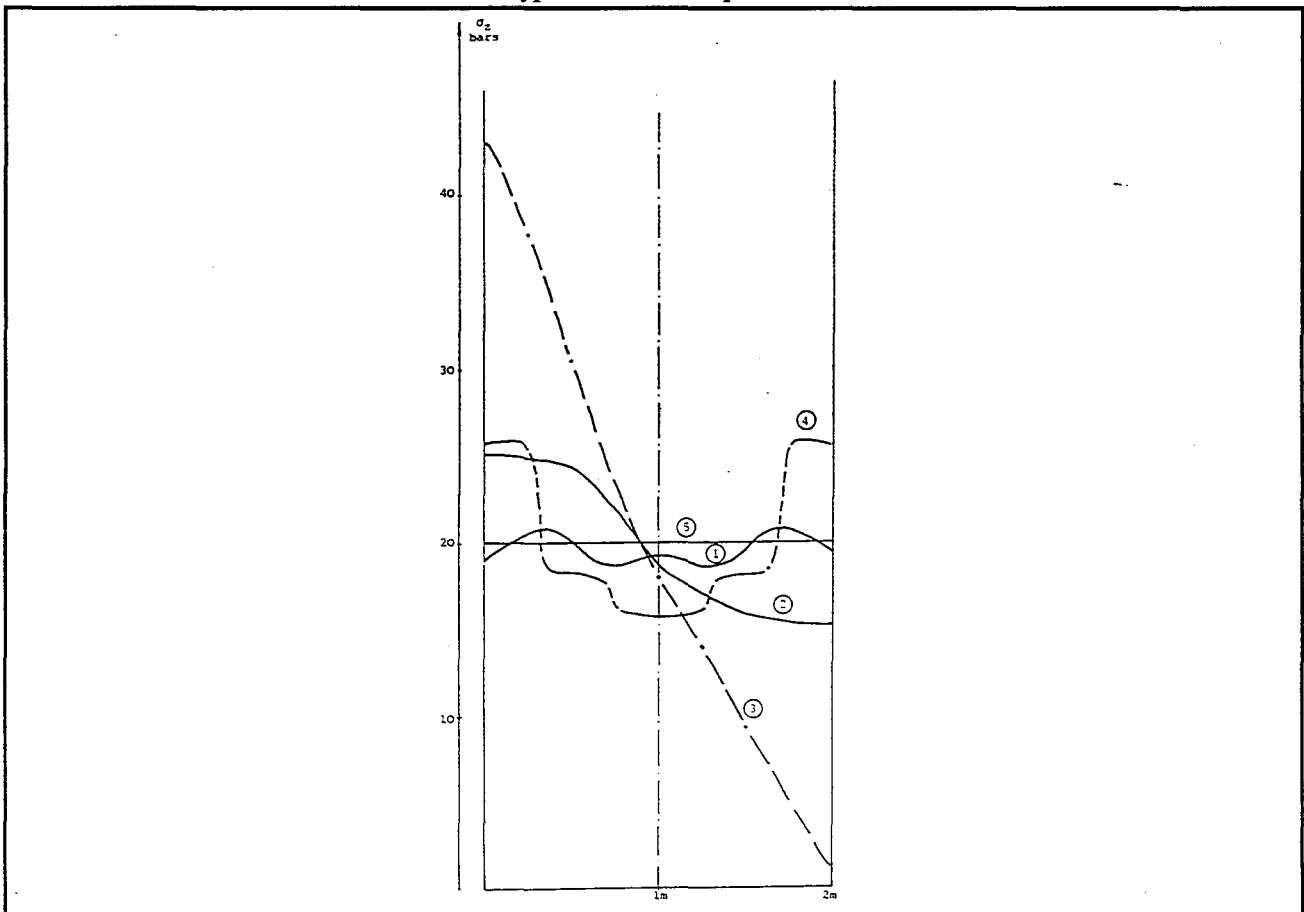
b : Contraintes verticales estimées.

Figure I.13 : Contraintes verticales au sein d'un pilier (d'après BONVALLET J., 1978).

Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE



a : Les hypothèses choisies pour le calcul.



b : Contraintes verticales selon les différentes hypothèses.

Figure I.14 : Contraintes verticales dans un pilier fracturé (d'après BONVALLET J., 1978).

Partie I - APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

Ce résultat semble être d'une grande importance pour les carrières souterraines abandonnées car, la largeur totale de ces exploitations est en général très grande vis-à-vis de leur profondeur. Au contraire, les exploitations par chambres et piliers limitées par des bords fermes, d'après le modèle, possèdent une plus grande stabilité et résistent mieux au vieillissement des piliers.

L'inconvénient majeur de l'analyse présentée réside dans le fait que la géométrie tridimensionnelle de l'exploitation est simplifiée dans le modèle en deux dimensions. En fait, l'état de contraintes dans un pilier sain dépend du nombre de piliers fissurés qui l'entourent dans toutes les directions et non pas une seule. C'est ce que montrent les résultats des calculs sur le modèle en trois dimensions. Comme l'indique la figure I.16, l'augmentation des contraintes verticales dans les piliers sains dépend non seulement du pourcentage des piliers fissurés, mais aussi de la disposition des piliers sains et fissurés.

b) Contraintes dans le toit

Dans les exploitations par chambres et piliers, la sollicitation du toit et en particulier le toit immédiat peut engendrer des ruptures par traction ou compression ou encore par cisaillement en présence d'une portée critique des chambres.

La présence du bord ferme limitant la largeur totale de l'exploitation favorise de façon considérable la stabilité du toit. Ceci peut être constaté par la comparaison de la répartition des contraintes dans le toit en présence et en l'absence du bord ferme.

Dans le cas où un pilier sain est voisin de deux piliers fissurés de chaque côté, l'augmentation de la contrainte principale majeure dans le toit du pilier sain est égale à 31% par rapport à la valeur de contrainte au sein des piliers fissurés, compte tenu du bord ferme alors que celle-ci atteint 108% lorsque la largeur totale de l'exploitation est très grande (figure I.17). Ces chiffres sont à comparer avec la variation de la contrainte verticale au centre d'un pilier dans le même cas (35% et 87%).

Cette simple comparaison permet de conclure qu'en raison de la ruine d'un certain nombre de piliers non seulement les piliers sains voisins sont menacés, mais aussi le toit de l'exploitation risque la rupture.

La figure I.18 illustre les tenseurs de contraintes principales dans le toit immédiat. Lorsque le nombre de piliers fissurés est plus important suivant une direction, les deux contraintes horizontales ne sont pas identiques. La valeur la plus faible s'applique au toit des chambres selon la direction du plus grand nombre de piliers fissurés. Cela signifie que les chambres limitées par des piliers fissurés sont moins stables que celles longeant des piliers sains.

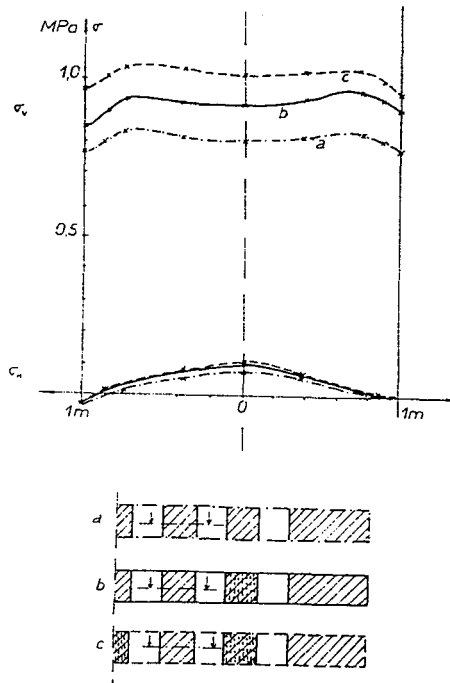
4.3. Autres modèles numériques

Une modélisation numérique par éléments finis a été faite dans une mine souterraine de charbon exploitée par chambres et piliers sous un flanc de coteau au sud du pays de Galles (JONES D. B. et al., 1992 [69]). Cette étude nous permet de mieux comprendre les mécanismes de rupture des ouvrages souterrains et notamment en présence du versant rocheux.

Nous avons retenu deux aspects essentiels : la sollicitation des piliers et des chambres après exploitation et la forte perturbation de l'état des contraintes au niveau de terrain de recouvrement (figure I.19a). Au toit des chambres la zone de traction atteint la surface en créant un report de charge sur les piliers voisins. Ces derniers perdent leur résistance progressivement en fonction du temps. Cette situation pourrait provoquer des instabilités comme le montre la figure I.19b.

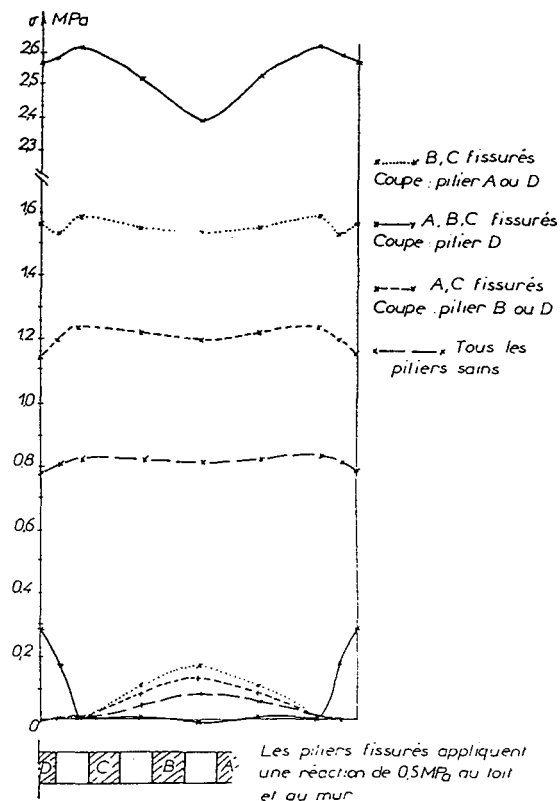
Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE

VARIATION DES CONTRAINTES SUR LE PLAN MEDIAN DU PILIER SAIN AVEC LA FISSURATION DES PILIERS VOISINS (en présence du bord ferme, $\alpha = 66\%$)



a : Variation des contraintes sur le plan median du pilier sain avec la fissuration des piliers voisins.

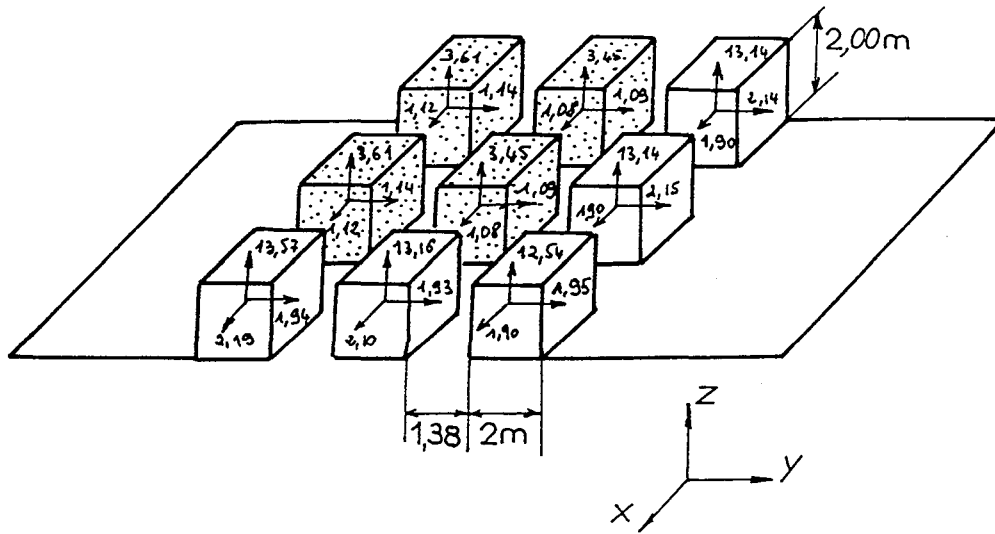
COUPE SUR LE PLAN MEDIAN DU PILIER SAIN ($\alpha = 66\%$, modèle en 2 dimensions, longueur de l'expl. infinie)



b : Coupes sur le plan median du pilier sain.

Figure I.15 : Estimation des contraintes en 2D (d'après GHOREYCHI M., 1983).

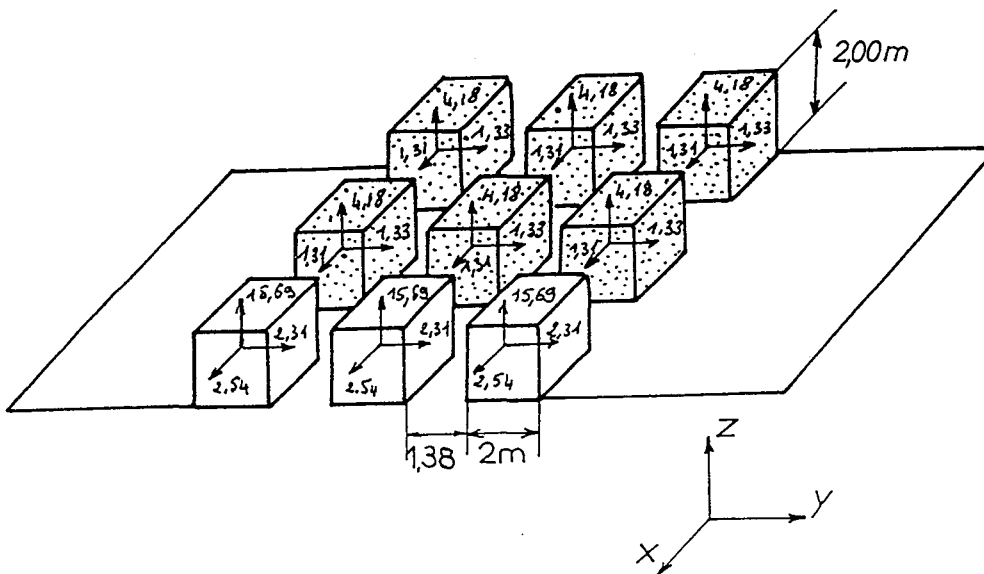
Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE



 piliers déconsolidés

a : 45 % des piliers en état dégradé.

(modèle en trois dimensions $\beta = 65\%$)

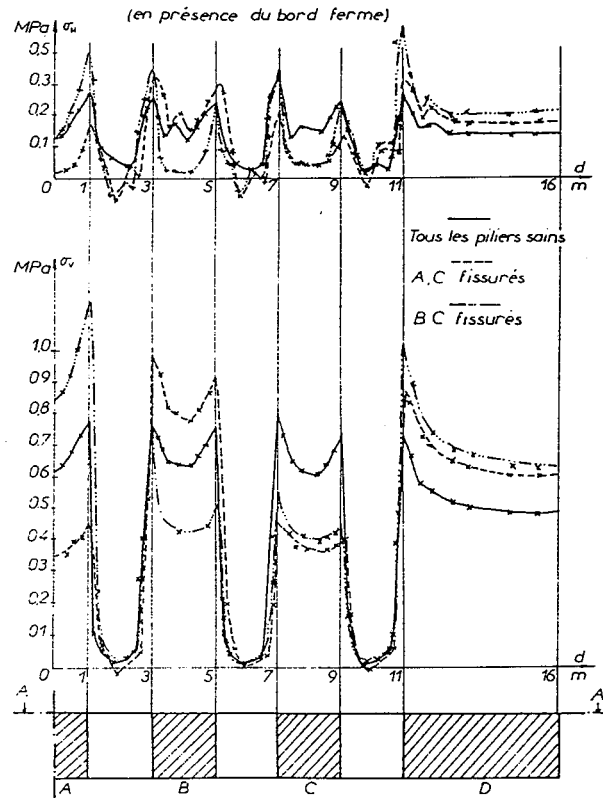


Contraintes en MPa $\times 10$

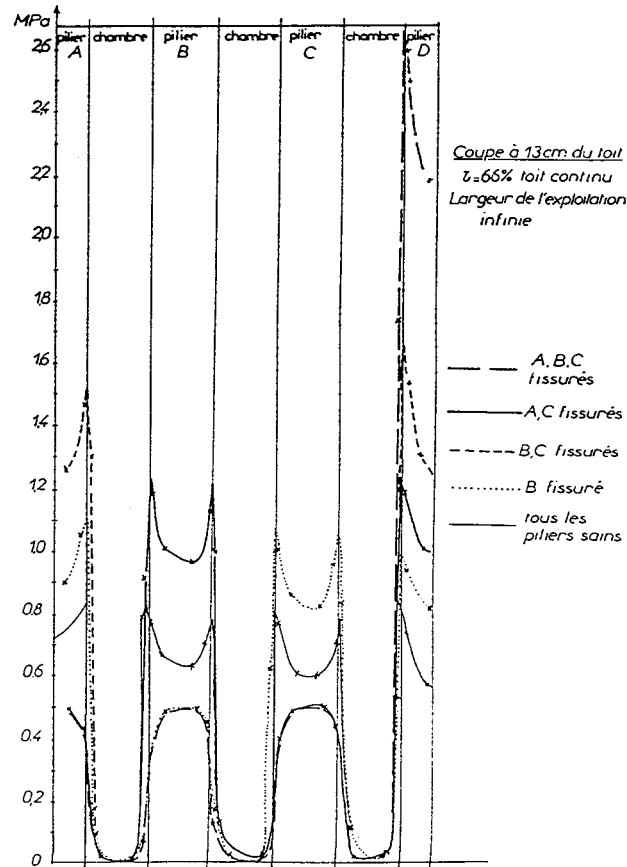
b : 67 % des piliers en état dégradé.

Figure I.16 : Les contraintes dans des piliers sains et fissurés (d'après GHOREYCHI M., 1983)

Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE



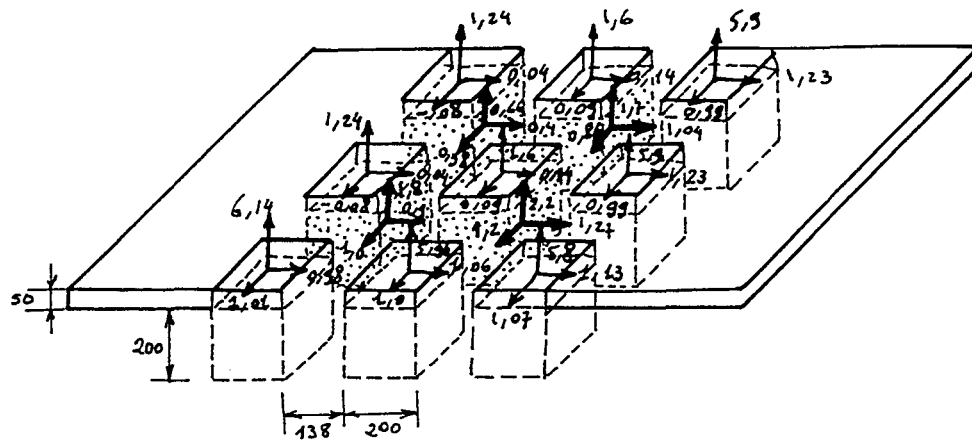
a : Modification des contraintes dans le bas toit due à la fissuration de certains piliers.



b : Répartition des contraintes principales majeures dans le toit dues à la fissuration des piliers.

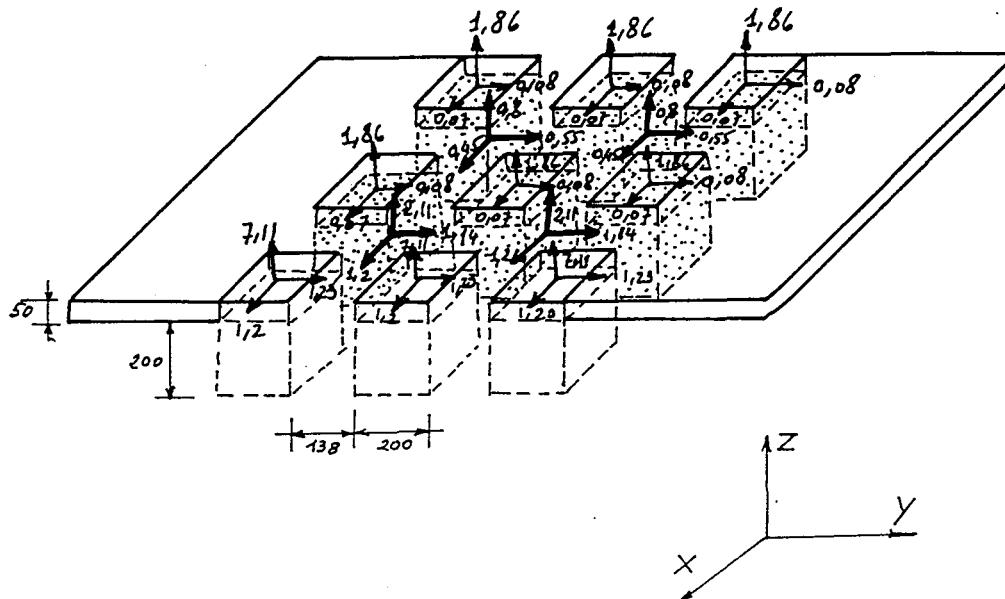
Figure I.17 : Estimation des contraintes au toit en 2D (d'après GHOREYCHI M., 1983).

Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE



Contraintes en MPa $\times 10$

a : 45 % des piliers en état dégradé.

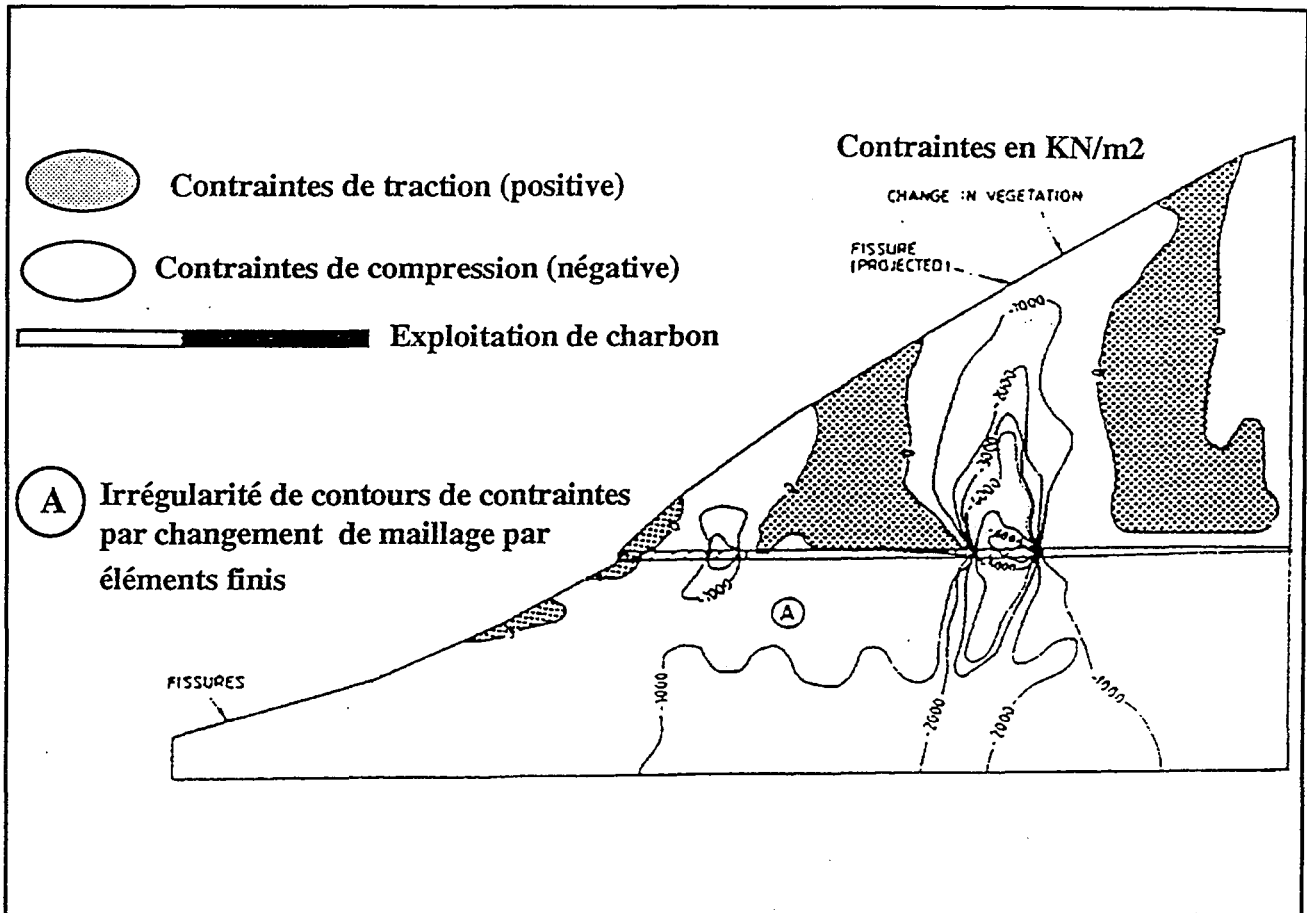


 pilier déconsolidé

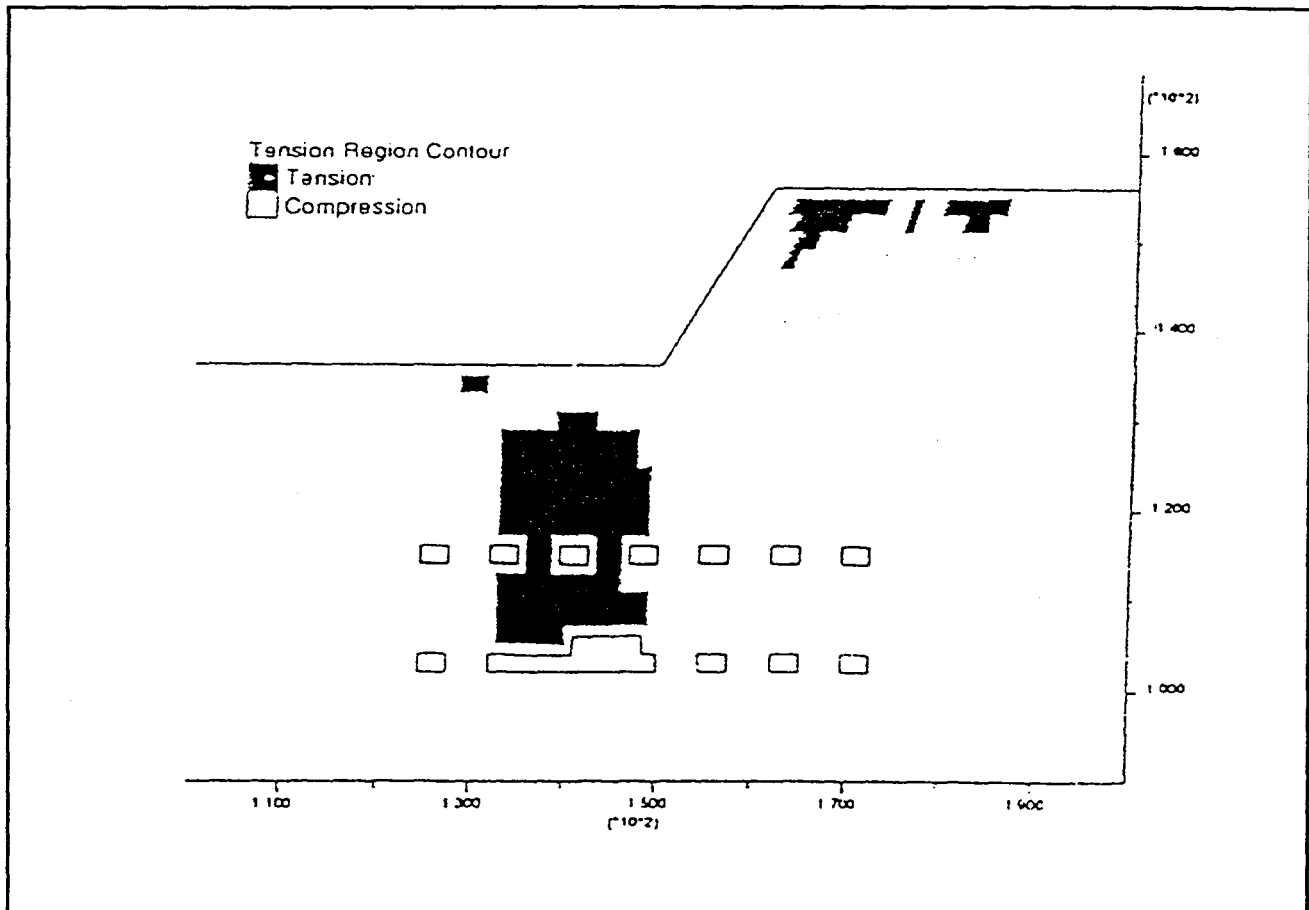
b : 67 % des piliers en état dégradé.

Figure I.18 : Les contraintes au toit avec des piliers fissurés (d'après GHOREYCHI M, 1983).

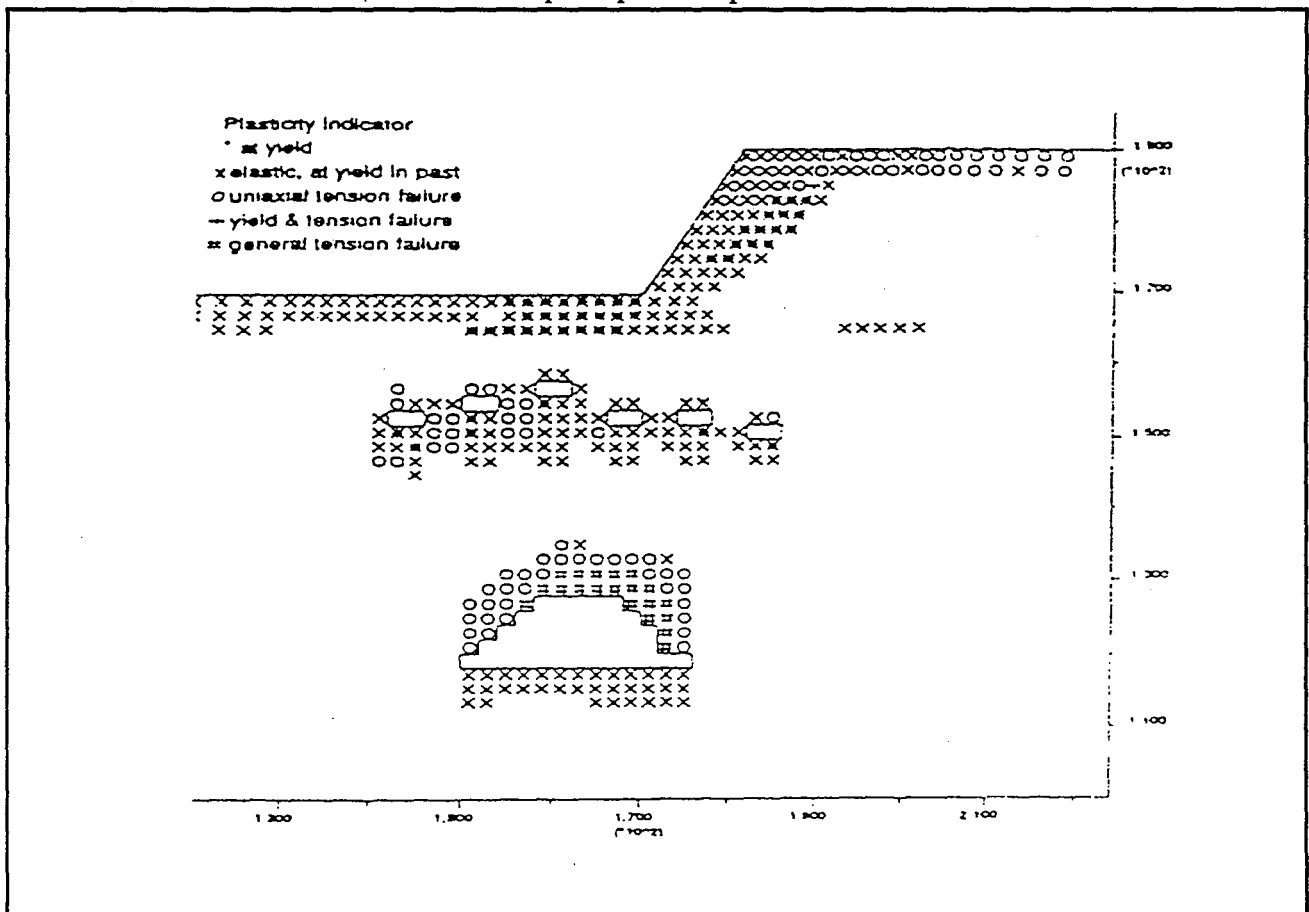
Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE



Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE



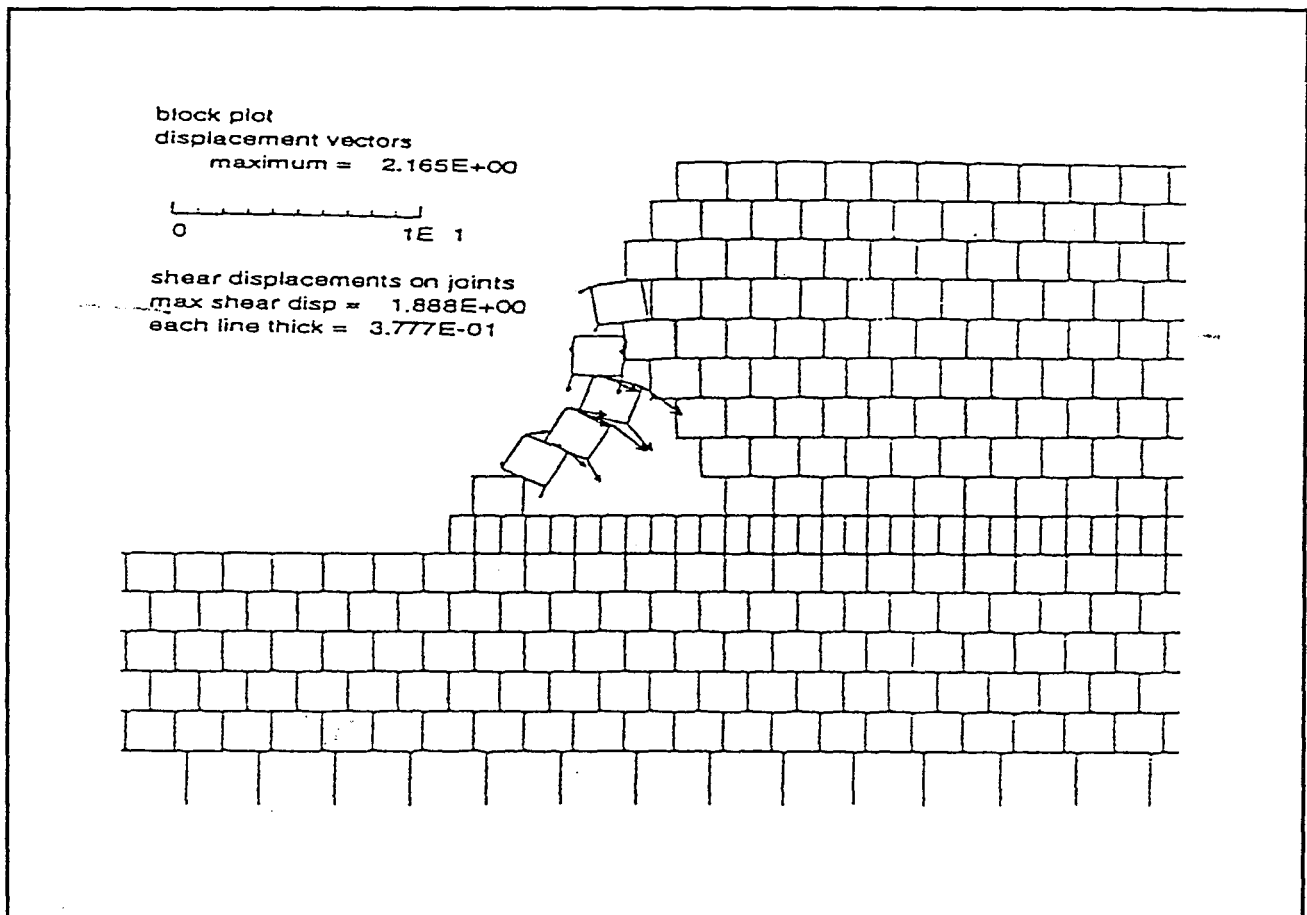
a : Zones de traction après rupture d'un pilier au niveau inférieur.



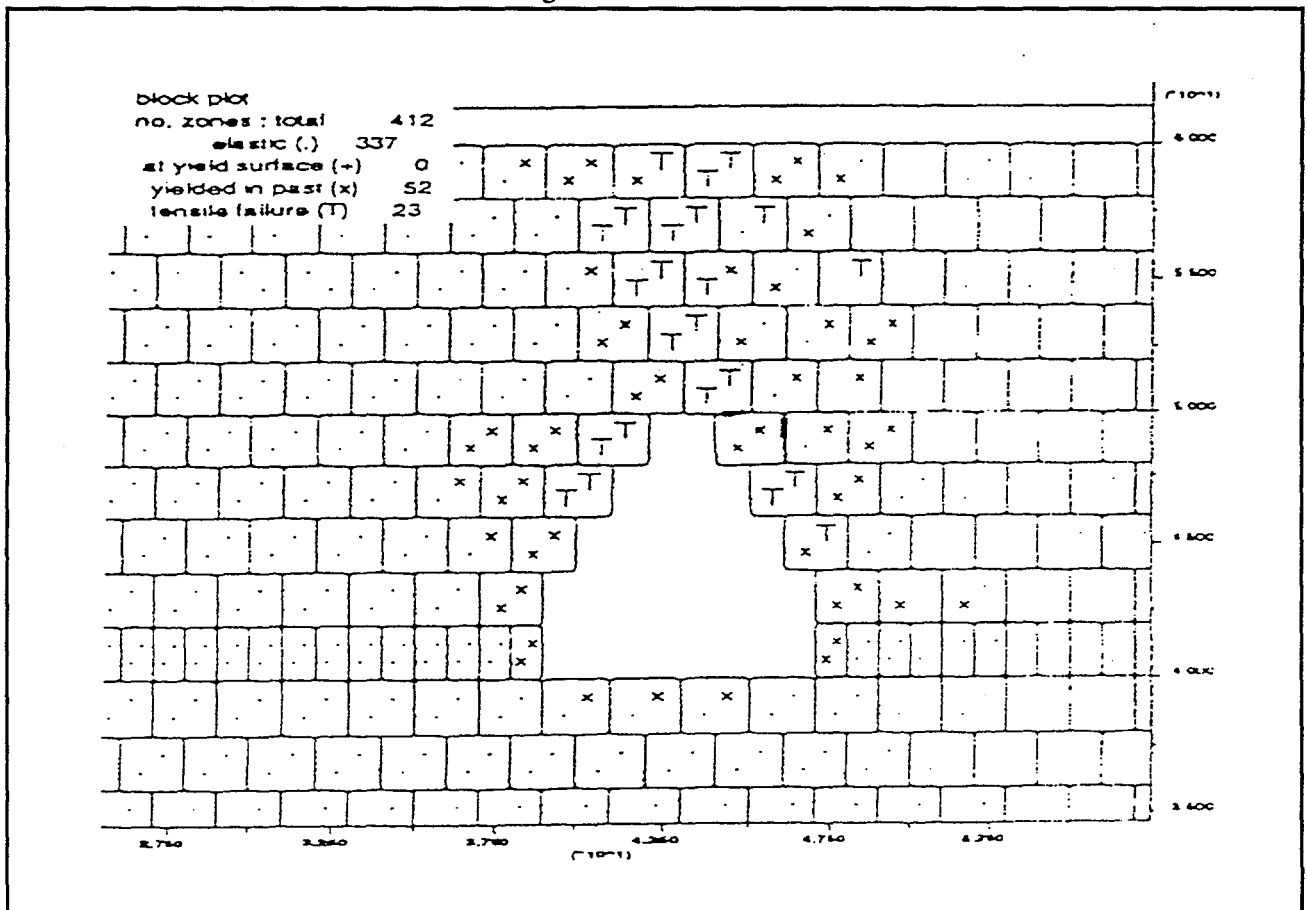
b : Points plastiques dans le cas d'un modèle contenant les trois travaux souterrains.

Figure I.20 : Calcul par différences finies sur les ouvrages (d'après STEAD D. et al., 1993).

Partie I - APERCU BIBLIOGRAPHIQUE



a : Simulation de l'effondrement d'une galerie sous l'effet de l'avancement d'une mine à ciel ouvert.



b : La zone de traction, alerte d'un prochain effondrement.

Figure I.21 : Calcul par UDEC sur des ouvrages souterrains (d'après STEAD D. et al, 1993).

Une modélisation par différences finies et par éléments distincts a été menée dans des exploitations souterraines (exploitation souterraine par chambres et piliers à faible profondeur à l'aplomb d'une exploitation par longue taille à une profondeur importante) et leur influence sur la stabilité d'une exploitation à ciel ouvert (STEAD D., BENKO B., 1993 [89]).

La figure I.20 illustre les résultats d'une modélisation par différences finies. On observe d'une part une importante zone de traction en simulant l'effondrement de deux piliers au niveau inférieur de l'exploitation (figure I.20a) et d'autre part le grand nombre de points plastiques dû à la progression de l'effondrement au niveau inférieur et à l'avancement d'une exploitation par longue taille en profondeur (figure I.20b).

La figure I.21 montre les résultats d'une modélisation par éléments distincts. On simule deux aspects différents : le premier concerne l'effet de l'avancement du front d'une mine à ciel ouvert sur des excavations souterraines (figure I.21a) et le deuxième représente l'évolution de l'état de contrainte de traction autour d'une excavation à très faible profondeur en tenant compte de la rupture progressive du toit (figure I.21b).

Ces derniers exemples illustrent des cas types des carrières souterraines complexes. Ils ont permis de nous apporter des éléments de réponse nouveaux en ce qui concerne les mécanismes de rupture les plus compliqués. L'un des mécanismes est celui lié à la présence d'une pente rocheuse au dessous de l'exploitation. L'autre concerne l'effet d'une rupture préexistante sur le reste des ouvrages d'une exploitation multiniveaux.

4.4. Conclusion

Les carrières souterraines en France représentent une menace sérieuse. Ces carrières se comptent par milliers sur le territoire et notamment dans la région parisienne, la région du Nord, la région de la Gironde, la région de Maine-et-Loire et d'autres. Des instabilités locales et/ou généralisées se sont déclenchées, se déclenchent et se déclencheront.

Pour lutter contre ces phénomènes et donner la meilleure sécurité de ces vieux travaux, il est nécessaire de suivre l'état des carrières souterraines sans oublier les facteurs naturels et industriels qui représentent l'environnement de ces dernières.

Suivre l'état, veut dire comprendre les mécanismes de rupture, les vraies sollicitations des ouvrages et l'évolution de processus de ruine. Les outils peuvent être les essais in situ, la modélisation numérique et la surveillance à distance si possible (JOSIEN J. P., 1995 [24]).

Dans ce qui suit, nous allons développer quelques idées dans ce sens afin de mieux comprendre les carrières souterraines complexes.

5. POSITION DU PROBLEME

Dans cette partie bibliographique sommaire, nous avons évoqué des travaux de recherche appliqués à des carrières souterraines en général et qui peuvent être utiles dans le cas des carrières souterraines complexes.

Pour mieux cerner les facteurs qui participent le plus à la complexité, nous avons commencé notre thèse par une base de données carrières suivie par une étude statistique multidimensionnelle. Cette partie permet en quelque sorte de préciser les vrais problèmes de complexité qu'ils soient d'origine internes ou externes.

Dans le cadre de cette thèse, nous allons étudier quelques carrières dites "complexes", telles que les carrières sous un flanc de coteau et multi-niveaux. Les principaux problèmes dans des configurations pareilles sont :

- dans le cas d'une carrière sous un flanc de coteau, nous avons tenu compte de l'état initial des contraintes en utilisant la modélisation par éléments finis et par éléments distincts,
- dans les carrières souterraines, l'exploitation se fait généralement par étapes : qu'on creuse des galeries sur une période déterminée (une ou plusieurs années). La sollicitation des ouvrages souterrains dépend donc du sens de progression des travaux. Pour cette raison, dans un modèle numérique, nous avons procédé par phases successives pour mieux estimer les contraintes et par conséquent localiser les zones à risques,
- dans les carrières souterraines, il existe beaucoup d'irrégularités comme les sections des piliers par exemple qui contribuent à les rendre aussi complexes. Nous parlerons également de l'influence de la fracturation induite et naturelle et les effondrements sur la sollicitation des ouvrages,
- les exploitations par chambres et piliers et notamment les carrières souterraines pourraient être traitées par une modélisation tridimensionnelle. Nous avons étudié un cas en 3D tout en les comparant avec des modèles 2D.

DEUXIEME PARTIE

**QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE
SOUTERRAINE COMPLEXE ?**

QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE SOUTERRAINE COMPLEXE ?

1. DEFINITION

Pour définir une carrière souterraine complexe il est nécessaire de comprendre quand, comment et où on exploite. Il faut comprendre de même l'évolution de l'état des carrières après exploitation et définir les principaux facteurs internes ou externes qui les rendent complexes en terme de sollicitation.

La plupart des carrières souterraines sont très anciennes : dans la région parisienne certaines carrières datent du XI^e siècle, dans le Nord et dans la région de la Gironde et Maine-et-Loire du VII^e. A cette époque l'exploitation en souterrain de la pierre à bâtir reste le seul moyen de satisfaire les besoins des constructeurs. La figure I.1 montre la localisation de ces vides souterrains en différentes régions de la France. Il est clair que la forte concentration d'exploitation se localise dans ces quatre dernières régions.

Au cours de la phase d'exploitation et compte tenu de la méthode d'exploitation dite " par chambres et piliers abandonnés", la partie excavée (chambres) provoque dans le terrain voisin une redistribution des contraintes naturelles. En effet, au sein des piliers la contrainte verticale le plus souvent de compression augmente considérablement ainsi accompagnée du phénomène de cisaillement. Au toit des chambres, des contraintes de traction se développent et notamment au toit immédiat et favorisent la rupture et des chutes de blocs.

Après exploitation et en liaison avec l'ancienneté de ces carrières, des instabilités locales telles que les chutes de blocs, la montée de voûte, les fontis, les ruptures de piliers et les effondrements localisés se déclenchent notamment dans les zones les plus défrutées. Ces instabilités locales permettent le phénomène de report de charge sur les piliers voisins qui subissent la rupture à leur tour en aboutissant à une instabilité généralisée. Les instabilités généralisées s'expliquent par la présence des couches plastiques au niveau du mur qui favorisent l'enfoncement des piliers ayant une résistance plus élevée. Cette situation peut déclencher un effondrement généralisé spontané (JOSIEN J. P., 1995 [24]).

En liaison avec les pentes naturelles du terrain de recouvrement (flanc de coteau, versant falaise et exploitation à ciel ouvert à l'aplomb de la carrière), la sollicitation des ouvrages souterrains devient critique au voisinage de l'entrée de la carrière. Une déviation de la contrainte principale majeure par rapport à la verticale peut atteindre 40° (VERDEL T., 1991 [96]; KHEDER K. et al., 1995 [25]) dans les piliers les plus proches de la base du versant. Les contraintes de cisaillement augmentent considérablement et provoque la rupture des piliers si leurs sections sont faibles. La prise en compte également de la fracturation naturelle et l'infiltration des eaux aggrave de plus en plus la situation. L'ensemble de ces problèmes peut engendrer un effondrement généralisé.

Parfois les conditions géologiques obligent l'exploitant d'aller chercher la matière première dans des couches puissantes ou dans des couches superposées séparées par d'autres non exploitables. Dans les deux cas l'exploitation s'appelle "multi-niveaux". La stabilité des planches intercalaires assure la stabilité de l'ensemble des niveaux. Une mauvaise superposition des piliers se traduit par une augmentation des contraintes de cisaillement dans les planches. On peut aboutir à des instabilités locales ou généralisées.

L'exploitation se fait généralement à une faible profondeur n'excédant guère une trentaine de mètres. Selon la configuration du terrain à la surface, il arrive que des cours d'eau à l'aplomb de la carrière (rivières) provoquent des infiltrations d'eaux par l'intermédiaire des failles et des cassures préexistantes. Ces infiltrations peuvent alimenter une nappe phréatique et par conséquent surchargent les piliers et le toit. Elles peuvent aussi créer des phénomènes karstiques dans des roches calcaires. Comme elles peuvent diminuer la résistance de la roche exploitée.

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?

Pour des raisons économiques, les carrières ont été exploitées en dessous des grandes villes ou à la proximité immédiate. Actuellement avec l'extension rapide de l'urbanisation, ces vides souterrains représentent un danger potentiel si leur stabilité est compromise. Les bâtiments lourds représentent une charge supplémentaire s'ajoutant au poids propre du terrain de recouvrement. Nous ajoutons aussi l'effet du trafic routier et ferroviaire qui se manifeste par un chargement dynamique provoquant la fatigue dans les piliers et au toit des chambres (BERTRAND B. et al., 1982 [10]).

La combinaison de l'ensemble des phénomènes évoqués précédemment dans une carrière donnée fait que la sollicitation de l'ensemble des ouvrages devienne complexe et nécessite une étude approfondie ayant pour but de mettre au point une méthodologie complète pour comprendre les mécanismes de rupture les plus compliqués.

Dans ce qui suit, nous résumons les principaux facteurs internes et externes qu'on peut les rencontrer dans les carrières.

Parmi les facteurs internes qui participent à la complexité des carrières nous citons :

- la fracturation induite par l'exploitation et l'irrégularité des sections des piliers.
- la superposition des niveaux avec le risque d'une mauvaise superposition des piliers d'un niveau à l'autre et d'instabilité de les planches séparant les niveaux.
- la présence d'effondrements qui représentent dans la majorité des carrières souterraines un facteur non négligeable déstabilisant les ouvrages et favorisant de nouveaux risques majeurs (BEAUFRERE C., 1986 [4]; JOSIEN J. P., 1995 [24]).

Parmi les facteurs externes qui menacent la stabilité des carrières souterraines et qui les rendent de type complexe, nous avons identifié :

- les cours d'eaux, il s'agit des rivières permanentes qui peuvent être en communication avec la carrière souterraine sous-jacente par l'intermédiaire du jeu des fractures induites et naturelles.
- un flanc de coteau au dessus de la carrière souterraine qui crée une déviation des contraintes principales et notamment au sein des piliers.
- une éventuelle venue d'eaux dans les carrières souterraines qui peut dégrader davantage le toit et les piliers, et permettre la réouverture des fractures géologiques.
- la présence dans le massif rocheux de phénomènes karstiques.
- les charges statiques et dynamiques, telles que les charges supplémentaires qui s'ajoutent au poids du terrain de recouvrement dues à des constructions et au trafic routier ou ferroviaire. On peut donc provoquer une fatigue dans la roche sous charge dynamique.
- la présence d'une exploitation à ciel ouvert au voisinage immédiat ou au dessus des carrières souterraines (l'exploitant abandonne parfois la méthode à ciel ouvert pour une exploitation souterraine ou le contraire).
- enfin, le problème d'un mur plastique dû à la présence d'une couche marneuse ou argileuse en dessous des piliers. Ce phénomène favorise le poinçonnement des piliers et/ou le gonflement du mur en présence de l'eau.

2. BASE DE DONNEES CARRIERES

2.1. Introduction

La reconnaissance des anciennes carrières souterraines nécessite à l'heure actuelle une étude approfondie portant sur les aspects pratiques, expérimentaux et historiques. Pour en définir les principaux paramètres, nous avons décidé de constituer une base de données rassemblant les principales caractéristiques liées à l'environnement naturel et d'exploitation de ces cavités souterraines qui menacent en continu la stabilité des biens à la surface.

Parmi des centaines des carrières souterraines existantes en France, nous en avons choisi une cinquantaine en ayant pour objectif :

- rester dans le cadre de la définition d'une carrière souterraine complexe, c'est-à-dire sélectionner les cas les plus intéressants de point de vue risque des instabilités majeures.
- avoir un échantillon représentatif des principales régions d'exploitation (la région parisienne, la région de la Gironde, la région du Nord et la région de Maine-et-Loire).
- de ne prendre en compte que les carrières les mieux caractérisées compte tenu du manque de caractérisation dans un grand nombre des carrières et de la limitation du temps et des moyens de l'étude.

L'étude de stabilité de ces carrières souterraines, dans chacune de ces trois régions a été confiée à l'INERIS (précédemment CERCHAR) et au BRGM (ou ANTEA).

La base de données comprend : 48 cas de carrières souterraines de la région parisienne, 46 cas de la région de Gironde, 45 cas de la région du Nord et Maine-et-Loire. Soit en tout 139 cas complexes où nous avons repéré les principales caractéristiques mécaniques, géométriques, de dégradation et les facteurs de complexité (voir annexe 2).

Sur le tableau II.1 (voir annexe 2), nous avons rassemblé des données liées à la caractérisation mécanique de la roche exploitée telles que : la résistance à la compression (R_c en MPa), la résistance à la traction (R_t en MPa), la résistance ultime en terme de fluage (R_u en MPa), le module d'élasticité (E en MPa), la vitesse des ondes longitudinales (V_l en m/s), la porosité (n en %) et le poids spécifique (P_{sp} en N/m^3).

En ce qui concerne les caractéristiques géométriques, nous avons rassemblé sur le tableau II.2 (voir annexe 2) : la section moyenne des piliers (S_p en m^2), le coefficient de variation sur la section des piliers (C_vS en %), la largeur des galeries (L_g en m), le taux de défrètement (Tau en %), le coefficient de sécurité (C_{sr}), la hauteur de vide (h_v en m), la hauteur de recouvrement (H_r en m), le rapport entre la longueur maximale de la carrière et la hauteur de recouvrement ($R=L/H_r$) et la superficie globale de la carrière (S_c en m^2).

Nous avons rassemblé sur le tableau II.3 (voir annexe 2) des données de dégradation dans les carrières telles que : le pourcentage de piliers sains (P_s en %), de piliers fracturés (P_f en %), de piliers très fracturés (P_{tf} en %), les effondrements (Eff en %, surface effondrée par rapport à la surface totale de la carrière), la densité de la fracturation mécanique (D_{fm} en m/m^2), la densité de la fracturation géologique (D_{fg} en m/m^2) et les karsts ($Karst$ en %, surface karstifiée par rapport à la surface totale de la carrière).

Enfin, nous avons regroupé sur le tableau II.4 (voir annexe 2) les facteurs liés à la complexité tels que : la présence de cours d'eau à l'aplomb de la carrière (CE), d'une carrière sous un flanc de coteau (FC), une exploitation multi-niveaux (MN), l'existence de venues d'eau (VE), la présence de karsts (KA), la présence d'effondrements anciens qui représentent une source de déclenchement des nouvelles instabilités dans les zones voisines (EF), les charges statiques et dynamiques telles que les bâtiments lourds et le trafic routier et ferroviaire (SD), la présence des travaux à ciel ouvert à l'aplomb de la carrière (CO) et la présence d'un mur plastique en dessous de la carrière (MP).

2.2. Méthodologie

Une cinquantaine des carrières souterraines ont été choisies pour chacune des trois régions. Ce choix a été fait de façon à cerner la notion de complexité, tout en tenant compte des données géotechniques, géomécaniques, de dégradation et des facteurs liés à la complexité.

La méthodologie de choix d'une carrière souterraine dite complexe, mise en oeuvre dans chacune des carrières est schématisée sur la figure II.1.

Dans une carrière souterraine donnée, nous disposons soit des données bien quantifiées, soit d'informations qualitatives.

Dans le premier cas, il s'agit des essais in situ et/ou au laboratoire (résistance à la compression, résistance à la traction, teneur en eau, mesure des contraintes au vérin plat etc...). De même, on quantifie l'état des piliers par mesures des vitesses ultrasoniques (piliers sains, piliers fissurés, piliers très fissurés ou ruinés).

Dans le deuxième cas, il s'agit des plans, des cartes géotechniques et des coupes géologiques où on note généralement les principaux facteurs de dégradation au toit, au mur et au sein des piliers (fracturation naturelle, fracturation mécanique, karstification, effondrements localisés et généralisés, chute de toit et fontis, mur plastique, venue d'eau, cours d'eaux à la surface et éventuellement la localisation de la carrière par rapport aux grandes villes.

A partir de l'examen des documents d'exploitation ou même sur les cartes et les plans, nous pouvons repérer l'existence des travaux antérieurs et la forme du terrain de recouvrement à la surface (ancienne exploitation à ciel ouvert, flanc de coteau et falaise etc.) ainsi que des carrières souterraines multi-niveaux.

En ce qui concerne les grandes carrières ou les carrières à multi-niveaux, nous les avons subdivisées en zones ou en étages. Cette démarche est acceptable puisque la plupart des facteurs d'exploitation et d'environnement naturel varient d'une zone à une autre ou d'un étage à l'autre.

2.3. Choix des variables

Notre préoccupation était de rassembler des données sur les carrières souterraines d'une manière simple balayant des conditions variées. Nous avons donc réussi à regrouper un nombre considérable des cas complexes grâce aux experts du domaine et la documentation des services départementaux.

Le choix des variables dans cette étude a été contrôlé par la définition d'une carrière souterraine complexe, décrite au début de ce chapitre.

Pour réaliser cette base de données, nous avons suivi des chemins différents : consultation des experts du domaine, recherche dans les rapports, consultation des fiches de relevés ou des bordereaux d'enquête et quelques visites.

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?

Trois fiches de relevés de la région parisienne, de la région Sud-Ouest et de la région du Nord et du Maine-et-Loire où différentes variables ont été indiquées, sont présentées en annexe 1.

La première fiche permet une description d'un site donné (matériau exploité, nature du recouvrement, géométrie de l'exploitation, caractéristiques mécaniques et caractéristiques des effondrements éventuels (circonstances, causes et nombre des victimes).

La deuxième rassemble par zones dans une carrière donnée, les différents éléments concernant l'état du toit, des piliers et du mur, ainsi que l'environnement de la carrière. Cette fiche est accompagnée d'une notice explicative (voir annexe 1). Les paramètres 1 à 9 décrivent la carrière souterraine et les paramètres suivants décrivent la zone d'étude dans la carrière.

La troisième fiche indique des informations générales en ce qui concerne les carrières souterraines visitées par les personnels du service départemental du Nord et du Maine-et-Loire.

Dans les rapports d'études de stabilité des carrières que nous avons rassemblés de l'INERIS (CERCHAR), du BRGM (ou ANTEA) et de chaque service départemental, nous trouvons généralement l'aspect mesures in situ et au laboratoire accompagné par des cartes géotechniques. Sur ces cartes on indique le plus souvent le degré de dégradation dans les carrières. La figure II.2 indique un cas de la région de Gironde présentant les principaux facteurs de dégradation.

Quatre tableaux ont été dressés (voir annexe 2), chacun des tableaux nécessite une vérification des informations données par les rapports, les fiches et les experts. Le premier tableau indique les variables géométriques, le deuxième les variables mécaniques et physiques, le troisième les variables représentatives de la dégradation et le dernier inclue les facteurs de complexité.

Cependant, il faut rester prudent en ce qui concerne les variables "fracturation mécanique", "géologique", "karst" et "effondrement". Nous avons quantifié ces variables selon une règle simple : estimation de la surface karstifiée par exemple par rapport à la surface totale de la carrière et la longueur cumulée d'une fracture dans un mètre carré de roche. Pour mieux estimer ces variables, un énorme travail de terrain est nécessaire.

Il convient de ne pas oublier aussi, que la majorité des carrières retenues dans cette étude sont des carrières anciennes et que tous les rapports consultés sont aussi anciens. Une variable mesurée peut changer de valeur avec le temps à cause de la dégradation en continu du terrain et des ouvrages.

2.3.1. Caractéristiques mécaniques et physiques

Le tableau II.1 (voir annexe 2) présente les principales caractéristiques des différents cas recensés.

Parmi les variables mesurées nous avons choisi :

- la résistance à la compression simple R_c (MPa).
- la résistance à la traction indirecte R_t (MPa).
- la vitesse de propagation des ondes longitudinales (m/s).
- le module d'Young E (MPa).
- la porosité du matériau n (%).
- le poids spécifique du matériau à l'état sec et à l'état saturé (KN/m^3).

Nous avons pris en compte aussi le comportement différé de la roche. Des essais de fluage à court terme et à long terme ont été effectués (BEAUFRERE C., 1986 [4]; JOSIEN J. P. et al., 1993 [23]; GHOREYCHI M., 1980 [58]).

2.3.2. Caractéristiques géométriques

Les données sont représentées sur le tableau II.2 (voir annexe 2)

La hauteur de vide est comprise entre 2 et 7 m. Dans le cas d'une carrière à multi-niveaux, la planche intercalaire est aussi variable (3 m à 16 m).

La forme des piliers est généralement rectangulaire et leurs dimensions variables, avec des sections comprises entre 10 et 147 m².

Les galeries (chambres) ont une largeur moyenne comprise entre 3 et 10 m d'une carrière à une autre.

Les carrières étudiées ont des superficies allant de 3000 m² jusqu'au 500000 m². On parle généralement de l'extension de la carrière (rapport de la plus grande longueur à la profondeur).

Le taux de défrètement (rapport de la surface exploitée à la surface totale de la carrière) calculé en tenant compte de la section moyenne (Sm) et le nombre total des piliers

La figure II.2 montre la vue en plan d'une carrière souterraine. On observe les caractéristiques principales de la géométrie de la carrière ainsi que des aspects de dégradation que nous pourrions décrire ci-après.

2.3.3. La dégradation dans les carrières

Dans les carrières souterraines, on note aussi la présence des fissures naturelles et induites par les travaux au toit et au sein des piliers et des effondrements anciens qui représentent un élément essentiel de la complexité des carrières (figure II.2).

a) Fissures naturelles

Elles sont présentes dans tous les massifs, qui ont eu à subir des contraintes au cours de l'histoire géologique. Par la suite, ces cassures se sont plus ou moins élargies et plus ou moins remplies d'argile sous l'effet de la circulation des eaux météoriques reçues par la surface du massif ou par une circulation des eaux souterraines; cela peut aller de la fissure fermée avec traces ferrugineuses jusqu'à l'ouverture de plusieurs mètres de large de type karstique (ROQUES M., 1986 [85]).

b) Fissures mécaniques induites

Au cours des travaux d'exploitation, la charge due au poids des terrains de couverture se concentre sur les piliers. La répartition se fait par l'intermédiaire de la dalle du toit.

La stabilité de la carrière souterraine ne peut être assurée que si les piliers et le banc du calcaire du toit sont capables de supporter la charge imposée par les terrains sus-jacents. Si cette charge est trop importante, la dalle du toit peut fléchir au milieu d'une portée importante entre deux appuis (piliers), ou bien les piliers peuvent s'écraser sous l'effet de la pression; dans les deux cas il y aura apparition de cassures.

Ainsi, dans la plus grande partie des carrières souterraines apparaissent des fissures au milieu de la portée entre deux piliers, c'est la première manifestation, puis la fissuration migre de part et d'autre vers la zone de très faibles contraintes, aboutissant à une rupture et à des chutes de toit.

c) Classification géotechnique des piliers

Pour classer les piliers en groupes homogènes, on utilise généralement la méthode d'auscultation ultrasonique (BONVALLET J., 1978 [5]). C'est une méthode d'étude directe permettant de détecter les discontinuités et/ou les hétérogénéités à l'intérieur d'un piliers (existence de joints, de fractures, etc...). Elle permet aussi d'apprécier l'état de dégradation des piliers et leur qualité mécanique.

En faisant appel à l'analyse en composantes principales ou l'analyse factorielle discriminante, on peut établir une répartition des piliers d'une carrière donnée en trois ou quatre classes géotechniques (voir figure II.3) :

- piliers sains (Ps en %),
- piliers fissurés (Pf en %),
- piliers très fissurés ou ruinés (Ptf en %),

d) Effondrements

A l'origine les instabilités au toit se traduisent par des chutes de blocs dans les galeries à portée critique. Ces chutes peuvent entraîner la formation de cloches et donner lieu à des effondrements qui remontent jusqu'en surface. Lorsque le taux de défrètement est très élevé (>90%), une rupture brutale des piliers provoque un effondrement qui remonte aussi jusqu'à la surface en formant des cratères de quelques mètres de diamètre. L'évolution et l'extension des effondrements font une superficie globale effondrée de plusieurs m² (voir figure II.2).

Les données de dégradation sont indiquées sur le tableau II.3 (voir annexe 2).

2.3.4. Les facteurs de complexité

Le tableau II.4 (voir annexe 2) rassemble les principaux problèmes qui peuvent menacer la stabilité des carrières souterraines et qui les rendent de type complexe (voir définition plus haut). Nous avons pris ces variables comme variables qualitatives pour l'analyse statistique.

2.4. Analyses statistiques

2.4.1. Première analyse

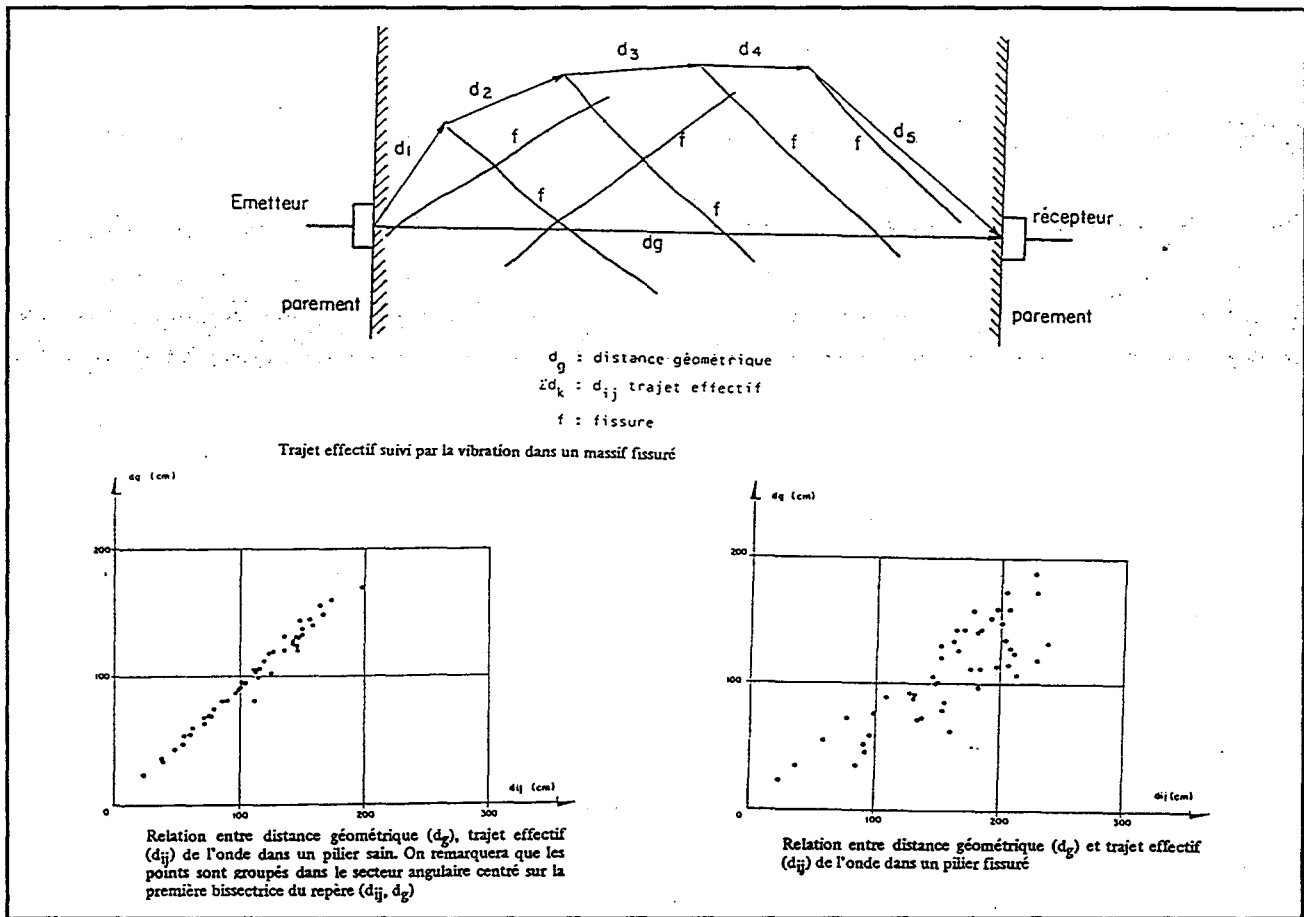
Dans un premier temps, une analyse en composantes principales a été entreprise dans le but de mieux voir les liaisons possibles entre les variables et les corrélations et ainsi de dégager les principaux facteurs qui menacent la stabilité des carrières souterraines.

C'est une méthode de réduction du nombre de variables permettant des représentations géométriques des individus et des variables. Cette réduction ne sera possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation non nuls. Cette réduction se fait par la construction de nouvelles variables initiales au moyen des facteurs en effectuant une combinaison linéaire (BERTIER P., BOUROCHE J. M., 1975 [47]; CHAMBON C. [52]; SAPORTA G., 1990 [88]) :

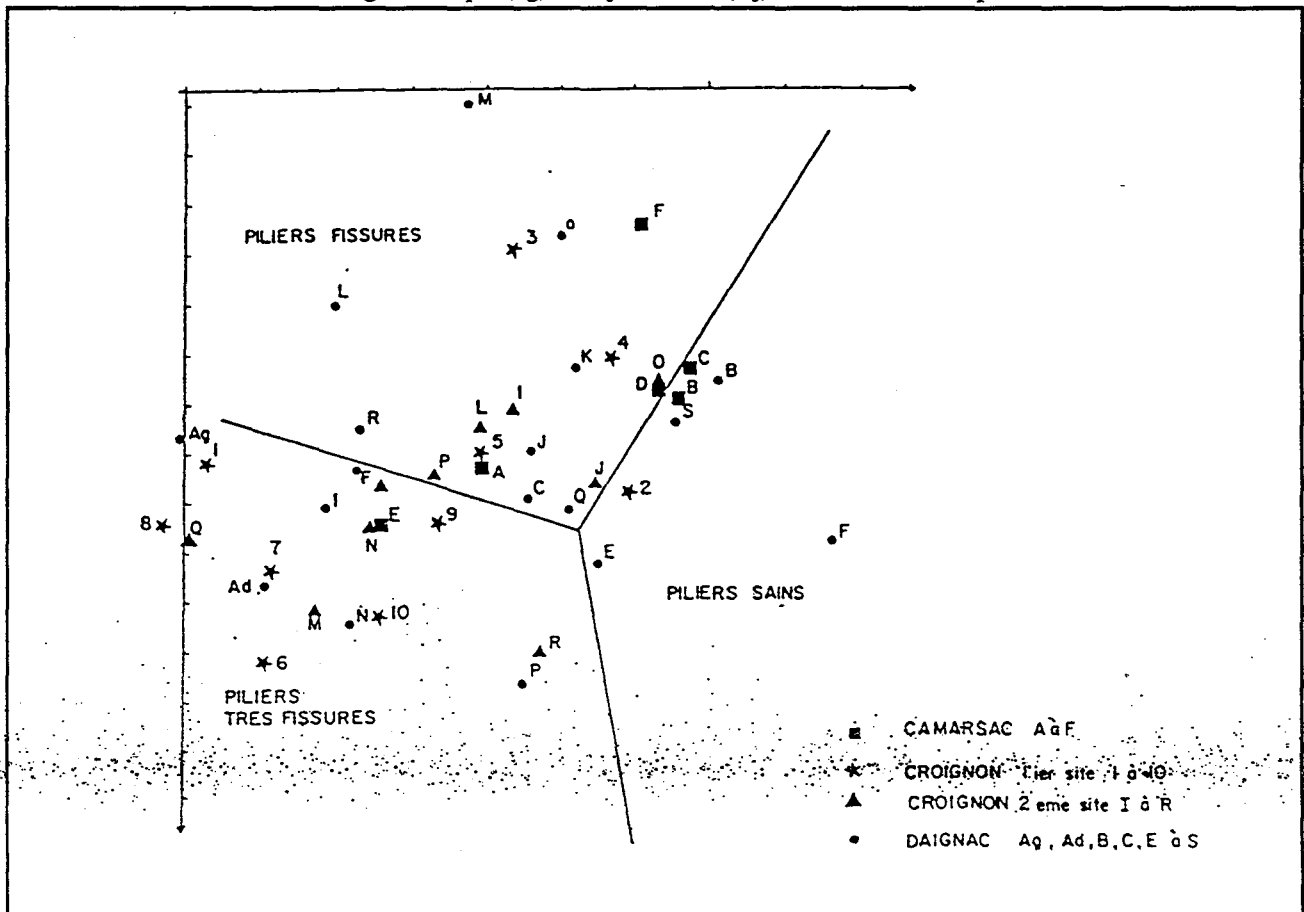
$$C^k = U_1^k \cdot X^1 + U_2^k \cdot X^2 + \dots + U_p^k \cdot X^p$$

où : $U_1^k, U_2^k, \dots, U_p^k$ les coefficients formant le k-ième facteur principal U^k ,

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?



a : Relation entre distance géométrique (d_g) et trajet effectif (d_{ij}) de l'onde dans des piliers sains et fissurés.



b : Résultats de l'analyse factorielle discriminante.

Figure II.3 : Classification géotechnique des piliers (d'après BONVALLET J. et al, 1983).

C^k la k-ième composante principale et X^p la p-ième variable initiale.

Nous avons effectué deux analyses en composantes principales (ACP) sur les carrières souterraines.

La première analyse prend les carrières souterraines région par région, c'est-à-dire une ACP sur la région parisienne, une autre sur les carrières de la région de la Gironde et la dernière sur les carrières du Nord et Maine-et-Loire.

La deuxième consiste à regrouper toutes les carrières souterraines afin de comparer les résultats avec l'analyse régionale.

Nous avons sélectionné 22 variables parmi les 33 variables de l'ensemble des quatre tableaux de notre base de données. Ce choix est tout à fait normal, puisque certaines variables sont dépendantes d'autres variables.

18 variables représentent dans l'ordre, la section moyenne de piliers Sm , le coefficient de variation sur les sections de piliers CvS , la hauteur de recouvrement Hr , le rapport d'extension de la carrière R , le taux de défrètement Tau , le coefficient de sécurité CSr , les résistances de la roche Rc , Rt et Ru , le module d'Young E , la vitesse des ondes longitudinales Vl , la porosité n , et les facteurs de complexité, les cours d'eaux CE , le flanc de coteau FC , les venues d'eaux dans les carrières VE , les charges statique et dynamique SD , les travaux à ciel ouvert CO et les karsts KA .

Quatre variables sont considérées comme variables supplémentaires : il s'agit des variables de dégradation, les piliers sains Ps , les piliers fracturés Pf , les piliers très fracturés Ptf , et les effondrements Eff .

L'analyse régionale et globale montrent presque les mêmes résultats en ce qui concerne la corrélation des variables avec les axes. Pour cette raison, nous commentons uniquement l'analyse globale.

Cette analyse montre que les carrières souterraines sont assez bien décrites par les deux premiers axes principaux. Les pourcentages d'inertie ou contribution de ces deux axes sont de l'ordre de 50 %. Le tableau II.6 montre la contribution des quatre premiers axes pour les quatre analyses. Globalement on peut dire que les deux premiers axes sont les plus significatifs. Sur le tableau II.5 nous regroupons les corrélations les plus significatives des variables avec les deux premières composantes principales.

La figure II.4 illustre le cercle de corrélation pour l'ensemble des carrières. Sur l'axe 1, nous avons une opposition de deux pôles de variables :

- les variables Rc , Rt , Ru , E , Vl , Hr , CSr et Sm qui représentent les résistances de la roche, la profondeur, le coefficient de sécurité et la section moyenne des piliers.
- les variables n , VE , Tau , CE et SD qui représentent la porosité, les venues d'eau, le taux de défrètement, les cours d'eaux et les charges statiques et dynamiques.

Pour une profondeur peu importante, l'exploitation n'est possible qu'avec une roche plus résistante et des piliers de section plus grande.

En revanche, à très faible profondeur l'exploitant garde des sections de piliers plus faibles c'est-à-dire un taux de défrètement plus fort. Cette situation provoque une sensibilité aux facteurs externes tels que les cours d'eaux, les venues d'eaux dans la carrière et les charges statiques et dynamiques par la présence des grandes villes et le trafic routier ou ferroviaire.

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?

Les caractéristiques mécaniques de la roche sont diminuées si cette dernière est très poreuse, et les facteurs externes (eau en particulier) agissent de façon encore plus déterminante.

En conclusion, nous pouvons dire selon cet axe que la caractérisation d'une carrière souterraine dépend très étroitement de la profondeur à laquelle elle a été exploitée, de la résistance de la roche exploitée, du dimensionnement des ouvrages souterrains et des facteurs externes et en particulier le facteur eau.

Ce premier axe caractérise **les règles de l'art**. L'exploitation à une profondeur plus grande, nécessite une bonne résistance de la roche et un bon dimensionnement des ouvrages souterrains.

Sur l'axe 2, nous trouvons aussi deux pôles de variables en opposition :

- les variables Ps, CO et FC qui représentent le pourcentage de piliers sains, la présence des travaux à ciel ouvert et la présence d'un flanc de coteau.

- les variables Eff, Pf, Ptf, Karst, R, CvS et CE qui représentent le pourcentage d'effondrements, le pourcentage de piliers fracturés, le pourcentage de piliers très fracturés, le pourcentage de karsts, le rapport d'extension de la carrière, le coefficient de variation sur la section des piliers et les cours d'eaux en surface.

Dans les carrières souterraines à forte extension et à forte dispersion dans les sections des piliers, dans un terrain fortement karstifié et en présence des cours d'eaux à la surface à l'aplomb de la carrière, nous avons toujours beaucoup de piliers fracturés, très fracturés et ruinés ainsi que beaucoup d'effondrements.

Dans le cas contraire, la carrière souterraine est en bon état, la majorité des piliers sont sains, malgré la présence des travaux à ciel ouvert et des flancs de coteau à l'aplomb de la carrière.

Ce deuxième axe nous informe sur les principaux facteurs qui participent au processus de dégradation dans les carrières souterraines et en particulier sur l'état des piliers.

Ce deuxième axe caractérise donc **la complexité**. La dégradation des piliers dépend étroitement des facteurs de complexité qu'ils soient internes ou externes.

2.4.2. Deuxième analyse

Dans un deuxième temps, nous avons introduit l'analyse factorielle discriminante (AFD). cette analyse permet de visualiser sur un plan factoriel les individus en les discriminant en groupes homogènes.

L'analyse porte sur les 139 carrières souterraines réparties dans trois groupes selon l'état des piliers : pourcentage élevé des piliers sains comme premier groupe (54 carrières souterraines), moitié piliers sains, moitié piliers dégradés comme deuxième groupe (46 carrières souterraines) et pourcentage faible de piliers sains comme troisième groupe (39 carrières souterraines).

Dans cette analyse, nous ne tenons compte que des variables quantitatives (tableau II.1, tableau II.2 et tableau II.3, voir annexe 2).

Les variables Pf, Ptf et Eff qui désignent respectivement : le pourcentage de piliers fracturés, très fracturés et le pourcentage d'effondrements dans les carrières souterraines sont éliminées. Le but de cette élimination est la dépendance de ces variables avec celles à expliquer (piliers sains).

Les principaux résultats sont présentés sur les figures II.5 & II.6.

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?

Variables	Sm	Hr	Csr	Rc	Rt	Ru	E	VI
Axe 1 (corrélations positives)	0.44	0.69	0.87	0.94	0.92	0.94	0.79	0.81
Variables	R	Tau	n	CEau	VEau	Charg	Karst	
Axe 1 (corrélations négatives)	-0.3	-0.26	-0.83	-0.37	-0.45	-0.25	-0.25	
Variables	Sm	Hr	n	FlCot	COuv			
Axe 2 (corrélations positives)	0.63	0.36	0.26	0.43	0.23			
Variables	Cvs	Tau	Rt	CEau	VEau	Charg	Karst	
Axe 2 (corrélations négatives)	-0.49	-0.71	-0.28	-0.51	-0.21	-0.22	-0.35	

Tableau II.5 : Corrélation des variables avec les deux premières composantes principales.
(carrières souterraines de l'ensemble des régions)

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?

Axes	% d'inertie (Paris)	% d'inertie (Gironde)	% d'inertie (Nord)	% d'inertie (Ensemble)
1	39.4	41.7	39.3	36.9
2	14.5	12.9	15.8	12.7
3	12.9	10.9	10.1	8.5
4	8.2	6.8	7.3	7.8

Tableau II.6 : Contribution des quatres premières composantes principales.

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?

Le tableau II.7 indique les corrélations inter-classes entre les variables et le premier axe factoriel. C'est le seul axe significatif dans cette analyse en raison d'une forte inertie et une probabilité nulle.

Le cercle de corrélation montre l'opposition de deux pôles de variables par rapport à l'axe 1 : d'une part et en corrélation positive, nous avons Rc, Rt, Ru, FC, CO, CSr, Hr, Sm, E et VI qui représentent la résistance à la compression, à la traction, ultime, le flanc de coteau, les travaux à ciel ouvert, la hauteur de recouvrement, la section des piliers, le module d'Young et la vitesse des ondes longitudinales.

D'autre part et en corrélation négative, nous avons Karst, CE, Tau, VE, CvS, R et n qui représentent les karsts, les cours d'eaux, le taux de défrètement, les venues d'eaux, le coefficient de variation des piliers, le rapport d'extension et la porosité.

Cette opposition des variables selon cet axe indique l'état des carrières par rapport au pourcentage des piliers sains.

Sur la figure II.6, l'AFD discrimine les carrières souterraines en trois groupes. Le groupe 1 représente l'ensemble des carrières en bon état (pourcentage élevé des piliers sains), le groupe 2 et le groupe 3 se rapprochent de l'axe 1 où le pourcentage des piliers sains est faible.

Cette discrimination nous amène à identifier les régions en France ayant des carrières souterraines plutôt stables ou le contraire.

La majorité des carrières souterraines de la région parisienne sont en bon état, suite à des travaux de confortement, de surveillance et d'aménagement par le service d'inspection générale des carrières. On note quand même quelques carrières souterraines en très mauvais état et notamment les carrières de banlieue du côté Versailles.

La majorité des carrières souterraines de Maine-et-Loire, de la Gironde et du Nord présentent une dégradation avancée, elles ont un fort pourcentage de piliers fracturés et ruinés.

Nous ajoutons que la plupart des carrières se situent sous un flanc de coteau précisément en Maine-et-Loire et en Gironde. Les carrières souterraines dans la région du Nord sont plutôt menacées par les venues d'eaux. La craie du Nord est très sensible à la présence d'eau.

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?

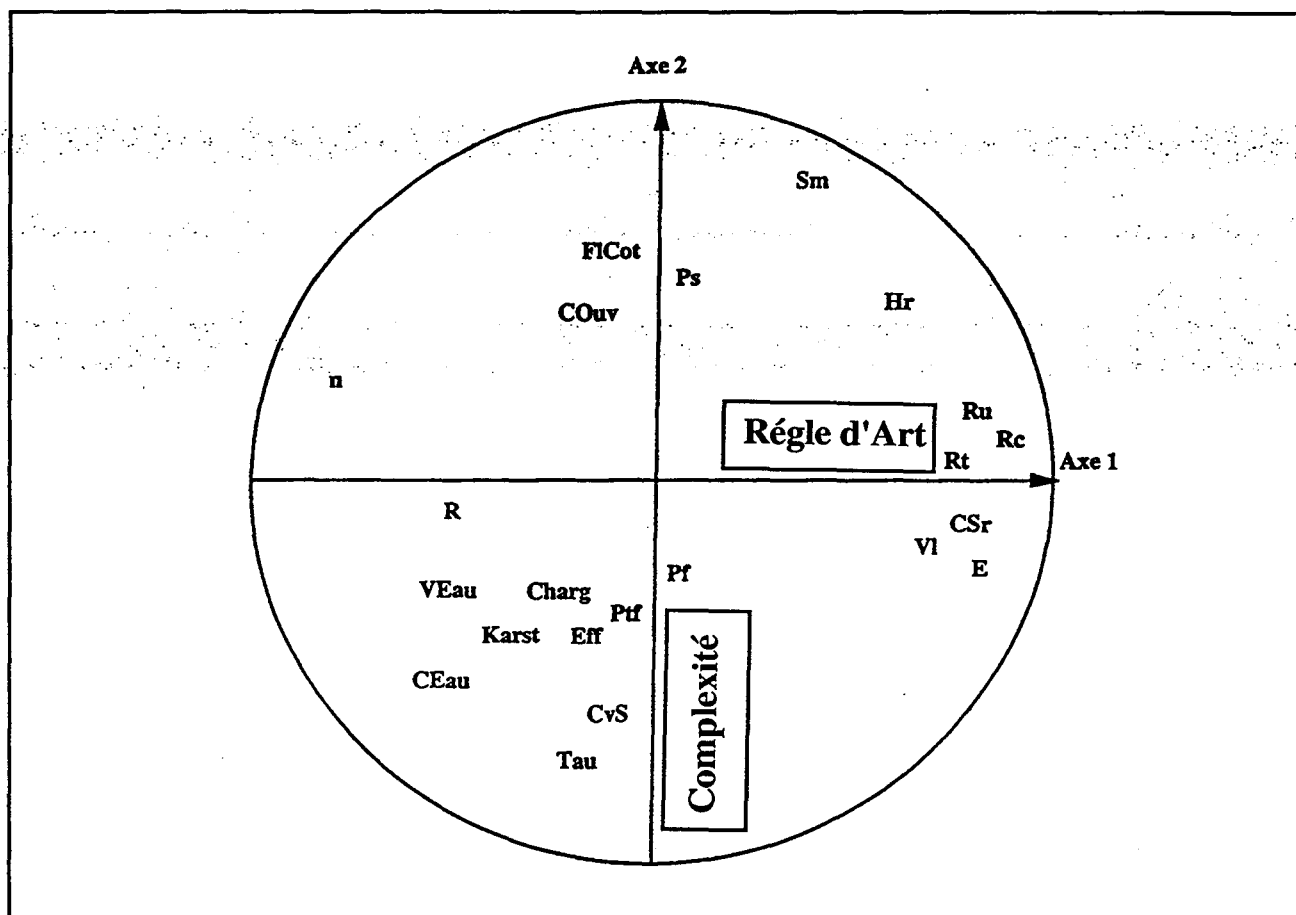


Figure II.4 : Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP).

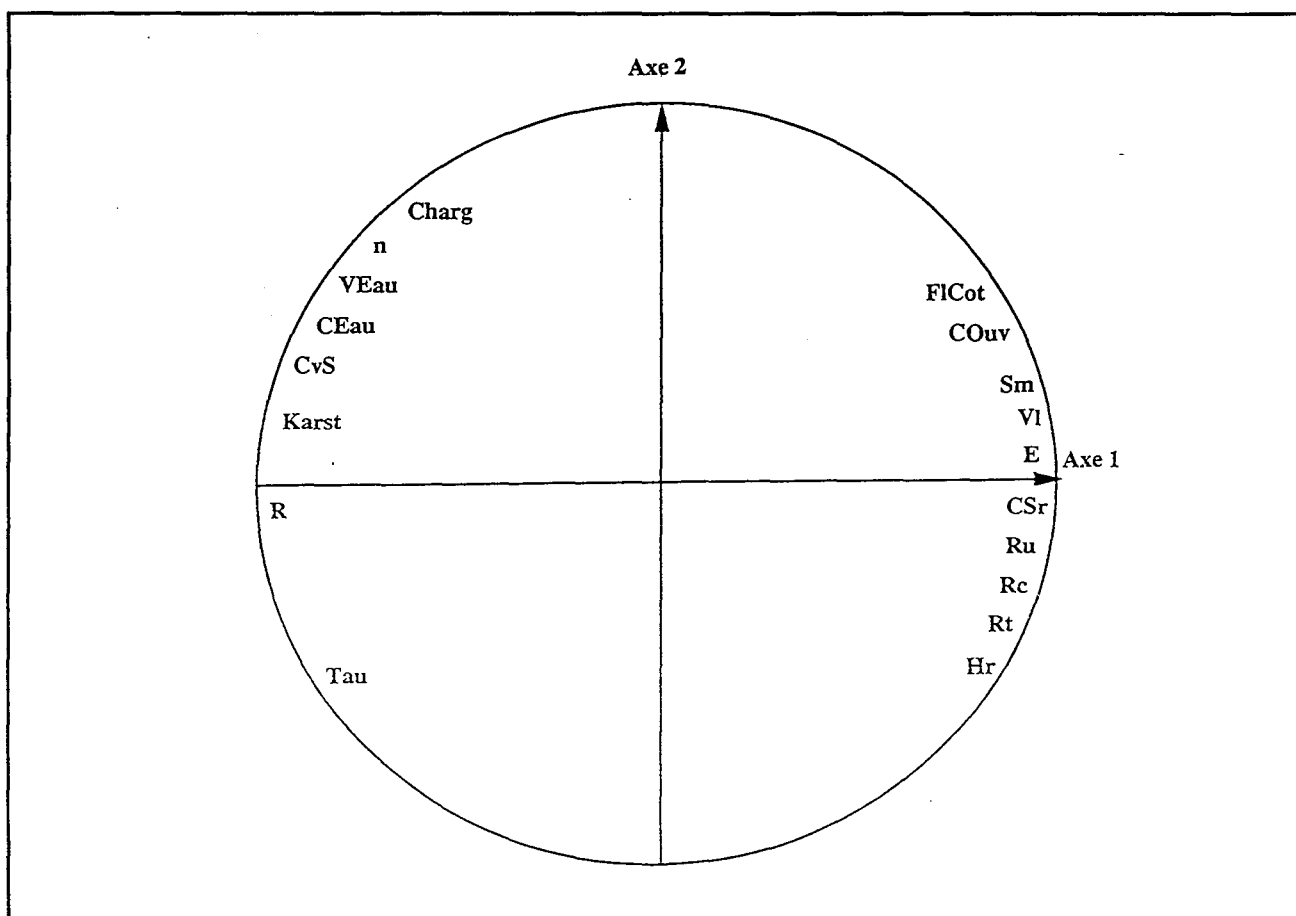


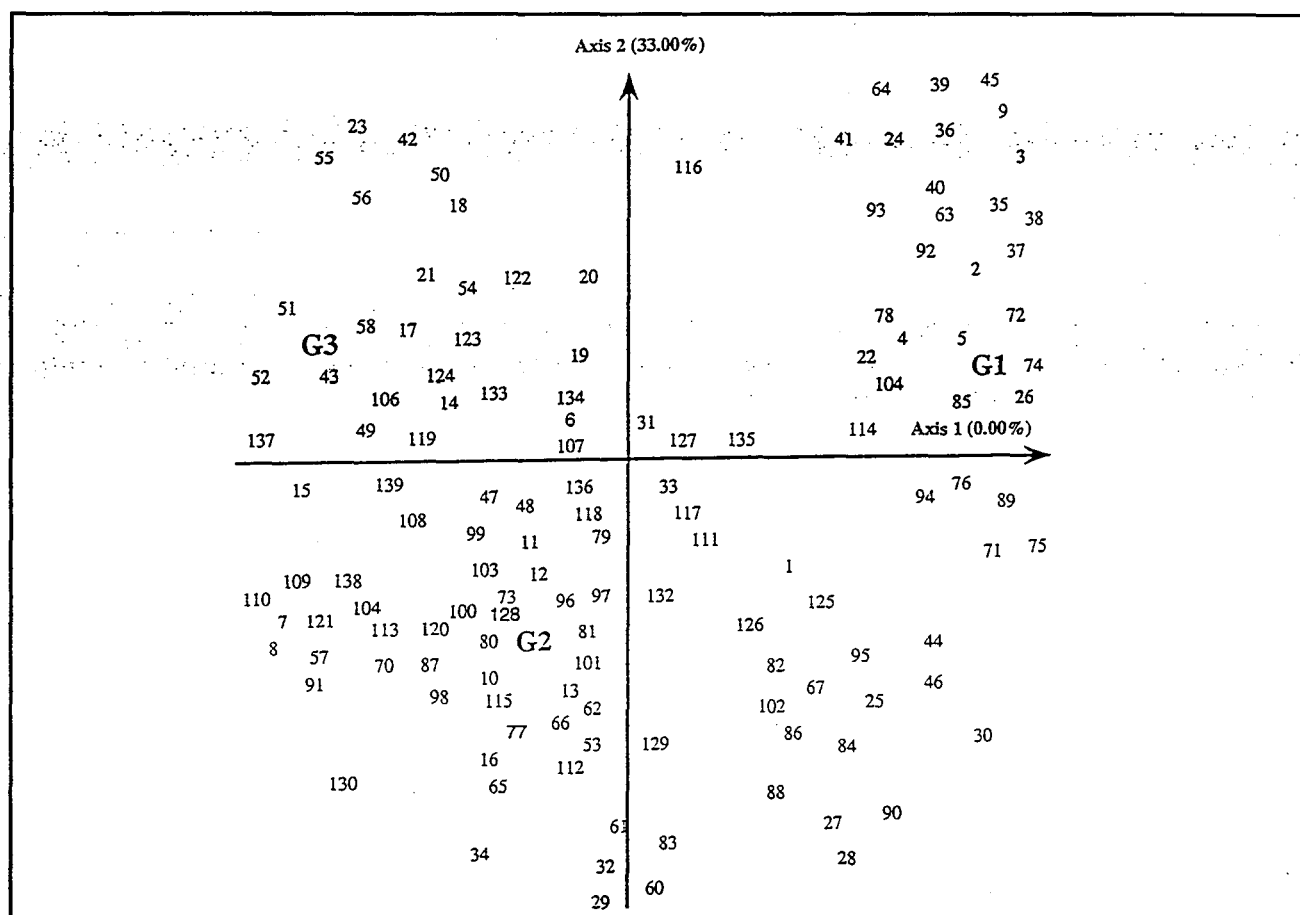
Figure II.5 : Résultats de l'analyse factorielle discriminante (AFD).

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?

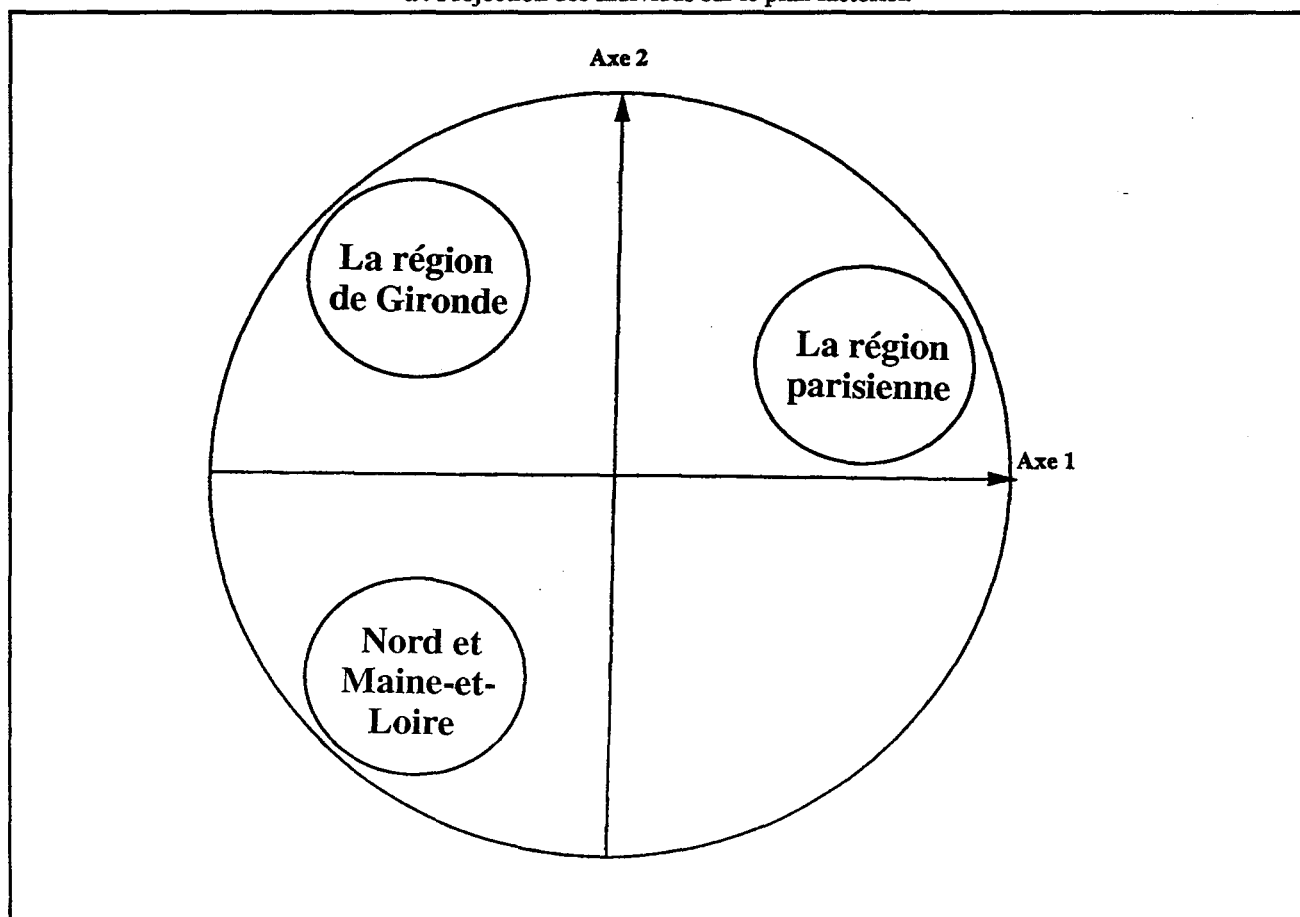
Variables	Sm	Hr	Csr	Rc	Rt	Ru	E	VI	FlCot	COuv
Axe 1 (corrélations positives)	0.97	0.65	0.86	0.7	0.69	0.76	0.9	0.96	0.95	0.98
Variables	Cvs	R	Tau	n	CEau	VEau	Charg	Karst		
Axe 1 (corrélations négatives)	-0.8	-1	-0.52	-0.65	-0.73	-0.64	-0.45	-0.99		

Tableau II.7 : Corrélations inter-classes entre les variables et le premier axe discriminant.
(carrières souterraines de l'ensemble des régions)

Partie II - QU'EST - CE QU'UNE CARRIERE COMPLEXE ?



a : Projection des individus sur le plan factoriel.



b : Interprétation des résultats selon ce plan factoriel.

Figure II.6 : Projection des individus (carrières) sur le plan factoriel (AFD).

2.5. Conclusion

La réalisation d'une méthodologie rigoureuse d'étude de stabilité des carrières souterraines complexes nécessite dans un premier temps une bonne connaissance de l'état de stabilité actuel de ces anciennes cavités. C'est pour cette raison que nous avons procédé à introduire la notion "base de données carrières". Nous avons réussi à rassembler une cinquantaine des cas dans quatre grandes régions en France (région parisienne, Gironde, Nord et Maine-et-Loire).

Pour élucider la complexité qui caractérise ces carrières, nous avons effectué une analyse statistique multidimensionnelle (analyse en composantes principales et analyse factorielle discriminante).

La première analyse a montré sur un plan principal approprié que toutes les carrières souterraines à très faible profondeur selon notre base de données sont en état de stabilité précaire même si les règles de l'exploitation ont été respectées. Les carrières à une profondeur plus importante, nécessite une roche ayant une résistance suffisante et un bon dimensionnement des ouvrages souterrains ce qu'on appelle la règle d'art. Parmi les facteurs internes qui expliquent le mieux la complexité dans les carrières, nous avons la forte irrégularité des piliers, la fracturation mécanique induite et les effondrements préexistants. Nous ajoutons aussi les facteurs externes tels que le problème d'eaux, les charges statiques et dynamiques et les phénomènes karstiques.

La deuxième analyse est capable de discriminer l'ensemble des carrières selon l'état des piliers. Nous constatons suite à cette analyse et selon notre base de données que la plupart des carrières de la région parisienne se caractérisent par un pourcentage élevé des piliers sains alors que les carrières des trois autres régions ont un pourcentage élevé des piliers très fracturés. En effet, c'est dans ces régions qu'on observe les phénomènes karstiques, les venues d'eaux et la manque de reconnaissance des vides, principaux facteurs de dégradation.

TROISIEME PARTIE

COMMENT MODELISER DES CARRIERES SOUTERRAINES COMPLEXES ?

1. INTRODUCTION

Dans toutes les études de stabilité des exploitations souterraines par chambres et piliers le dimensionnement préalable (pour les exploitations nouvelles ou le diagnostic pour les exploitations minières) repose sur le calcul d'un coefficient de sécurité local et global. Celui ci se définit comme le rapport entre la résistance à une sollicitation et la valeur de cette sollicitation (qui peut être une compression, une traction, un cisaillement, etc...). Pour déterminer cette sollicitation, il est nécessaire de recourir à la modélisation à la fois pour comprendre les mécanismes possibles d'instabilités, identifier les sollicitations susceptibles d'être critiques et déterminer leurs valeurs.

Par exemple, une exploitation multi-niveaux rend une carrière souterraine complexe, en effet, la sollicitation des piliers, des planches intercalaires dépend de la bonne ou mauvaise superposition des niveaux. La situation devient plus compliquée si on a un flanc de coteau au dessus de la carrière. C'est pourquoi nous nous sommes préoccupés d'évaluer la sollicitation de l'ensemble des ouvrages souterrains en tenant compte de la présence d'un flanc de coteau.

L'étude par modèles numériques dans le cas des carrières souterraines complexes, nous oblige à admettre des hypothèses simplificatrices par exemple. Nous travaillons souvent en deux dimensions. Nous avons cherché à évaluer l'erreur due à cette simplification et à la corriger.

Par la suite, nous avons tenu compte dans les modèles des discontinuités induites et naturelles. D'une part, à connaître le rôle des discontinuités vis-à-vis la sollicitation des ouvrages fracturés et d'autre part, leur effet sur la stabilité (chute des blocs par exemple).

2. COMMENT EVALUER LES SOLLICITATIONS DANS LE CAS DES CARRIERES SOUS UN FLANC DE FALAISE ?

2.1. Introduction

L'exploitation de la pierre de taille en souterrain sous un flanc de coteau en France est fréquente (voir annexe 2, tableau 4). Cette configuration présente quelques problèmes vis-à-vis la stabilité de vides souterrains : l'ouverture des fractures naturelles par ruissellement des eaux au niveau de la base, les piliers les plus proches de l'entrée de la carrière subissent une fracturation mécanique et des glissements de terrains dans le cas où la dégradation devient très avancée.

Nous allons étudier deux cas de carrières souterraines où l'exploitation a été commencée sous une falaise (figures III.1 & III.2 & III.3)

Notre objectif est d'évaluer la sollicitation des chambres et piliers, en cherchant à élucider les points suivants :

- comment calculer l'état initial dans le cas d'une carrière sous un flanc de coteau ?,
- la détermination de l'évolution de l'état de contraintes dans les piliers et au toit des chambres en fonction de l'avancement de l'exploitation,
- l'influence de la reprise de l'exploitation au fond de la carrière sur la stabilité des piliers,
- nouvel état de sollicitation des chambres et piliers dans le cas où la reprise est généralisée dans la carrière,
- focalisation d'un calcul par éléments finis sur une zone bien définie à partir d'un modèle global.

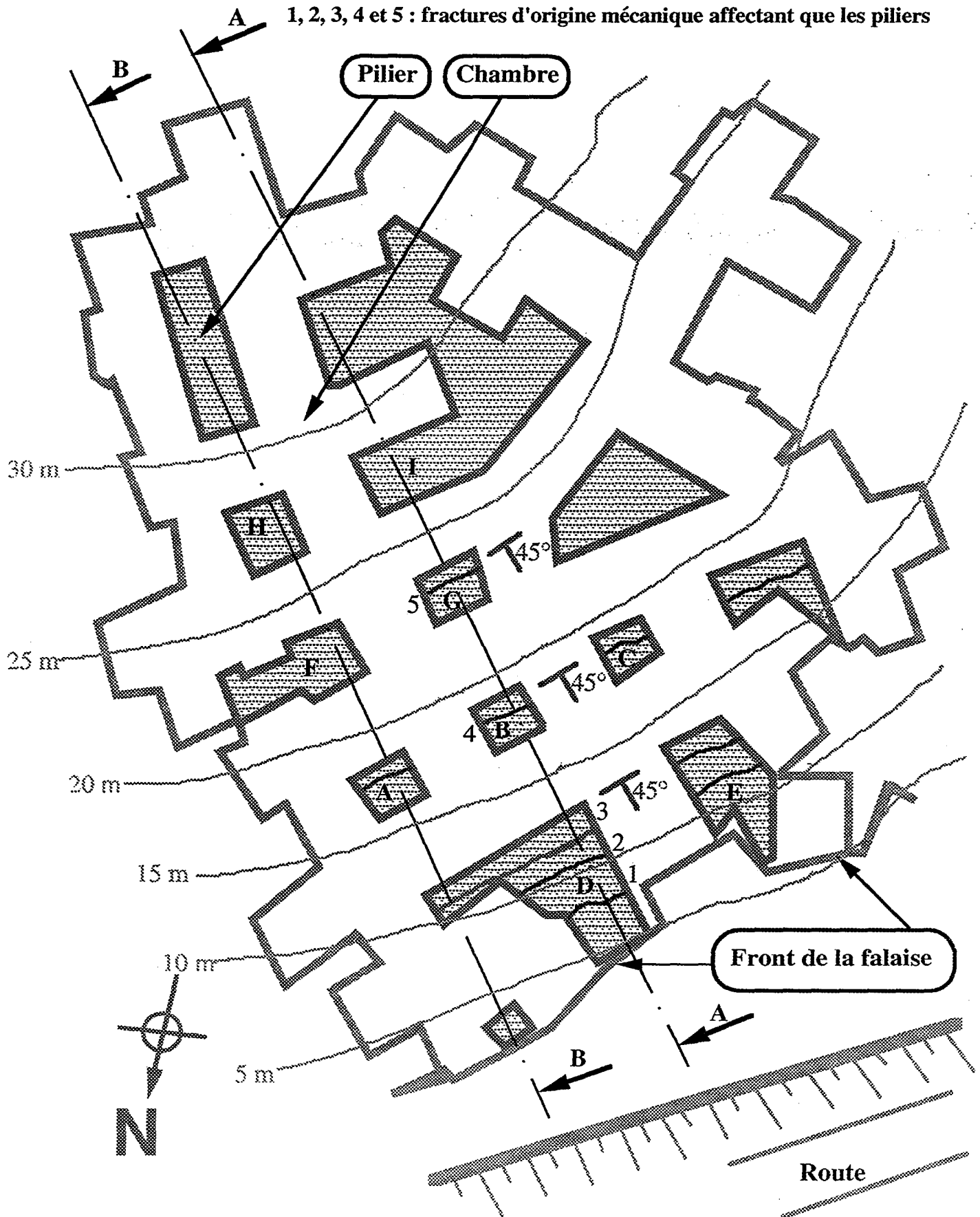


Figure III.1 : Plan de la carrière avec les traces des deux coupes - Echelle : 1/500

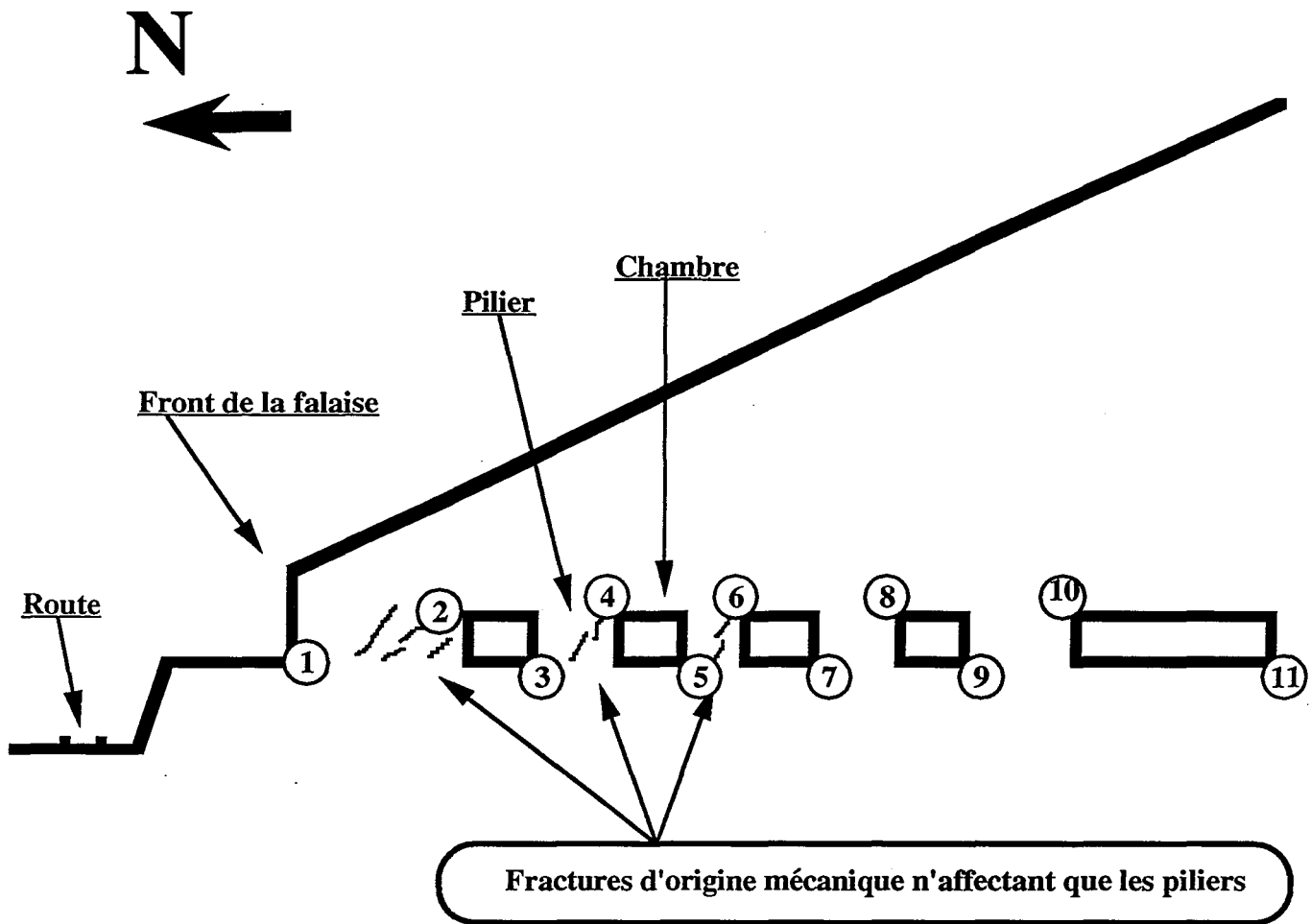


Figure III.2 : Vue en coupe avec les points critiques, coupe A-A - Echelle : 1 / 500

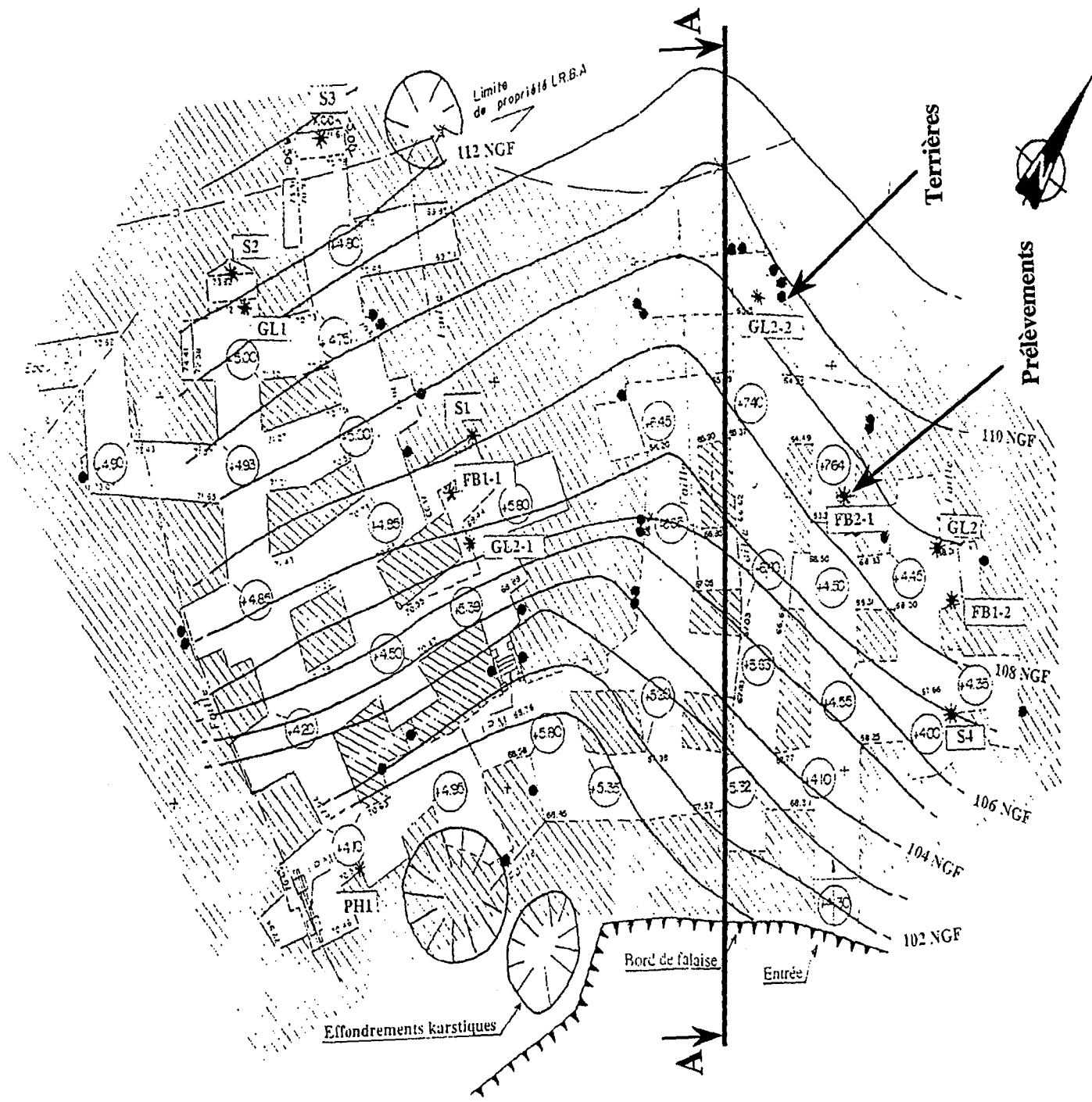


Figure III.3 : Plan de la carrière souterraine Vernon (27). Echelle 1 cm=5 m

Matériau	C1(toit)	C2 (explo.)	C3 (mur)
Masse volumique	23 (KN/m3)	23	23
Module d'Young	5000 (MPa)	5200	6000
Coefficient de poisson	0.3 (-)	0.3	0.3
Rc	8 (MPa)	12.5	13
Rt	0.6 (MPa)	0.78	1.2
Cohésion	0.9 (MPa)	1	1.5
Angle de frottement	30 (°)	30	30

**Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques des couches
(carrière sous flanc de coteau)**

	E (MPa)	nu	Rc (MPa)	Rt (MPa)
Couche toit	3000	0.3	9	0.8
Couche exploi.	4000	0.3	10	1
Couche mur	3000	0.3	9	0.8

**Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques des couches
(carrière sous une falaise)**

Point de mesure	Pilier D	Pilier B Nord	Pilier B Sud	Pilier G Nord	Pilier G Sud	Pilier F Nord	Pilier F Sud	Pilier H Nord	Pilier H Sud
Profondeur (m)	8	15	15	20	20	22	22	25	25
Sv mesurée (MPa)	0.17	0.82	0.14	0.9	0.78	1.16	0.3	1.03	0.9
Sv calculée (MPa)	0.43	1.45	1.45	1.59	1.59	2.07	2.07	2.31	2.31

Tableau III.3 : Résultats des mesures au vérin plat et du calcul par l'aire tributaire

2.2. Comment calculer l'état initial ?

La détermination de l'état initial des contraintes lorsque la surface n'est pas horizontale, ne peut se faire qu'au prix d'hypothèses fortes. Il peut être évalué au moyen de calculs analytiques ou numériques.

2.2.1. Calculs analytiques

Le calcul des contraintes naturelles sous un versant rocheux peut être fait sous trois hypothèses différentes : soit en supposant que le milieu est élastique et infini, soit que le milieu est pulvérulent en équilibre limite soit avec l'hypothèse de la relaxation complète.

a) Hypothèse n°1

En supposant le milieu élastique et en écrivant que les déformations parallèles à la pente sont nulles (hypothèse d'un massif infini), les contraintes à une profondeur z sont données par les expressions suivantes (figure III.4a) :

$$\begin{cases} \sigma_x^0 = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta \\ \sigma_y^0 = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta \\ \tau_{xy}^0 = \gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cos \beta \end{cases}$$

b) Hypothèse n°2

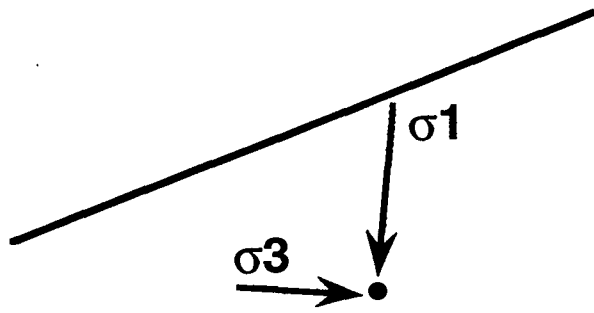
Les versants naturels sont souvent proches de l'équilibre limite; si le massif peut être assimilé à un milieu sans cohésion avec un angle de frottement interne φ , l'équilibre limite correspond à $\beta = \varphi$ (figure III.4b).

Les contraintes principales σ_1^0 et σ_2^0 font respectivement avec l'horizontale des angles de $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ et $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ et sont données par les expressions suivantes :

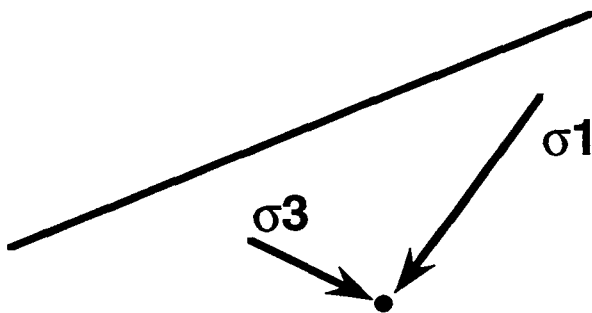
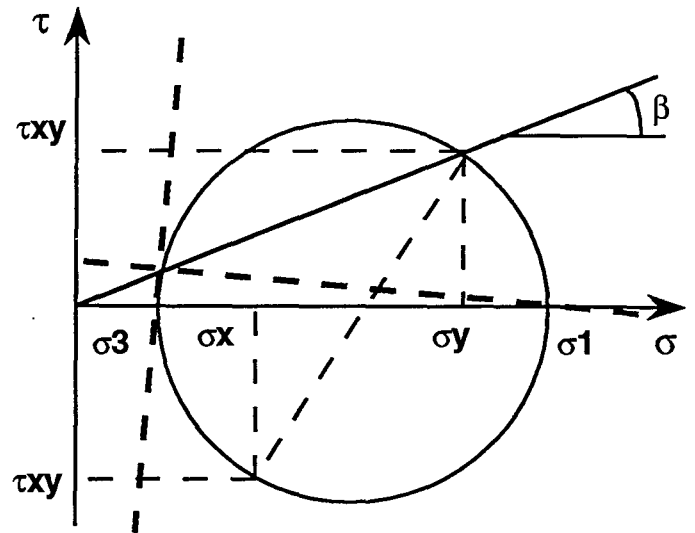
$$\begin{cases} \sigma_1^0 = \gamma \cdot z \cdot (1 + \sin \beta) \\ \sigma_2^0 = \gamma \cdot z \cdot (1 - \sin \beta) \end{cases}$$

c) Hypothèse n°3

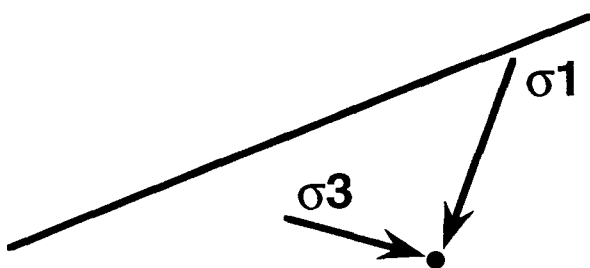
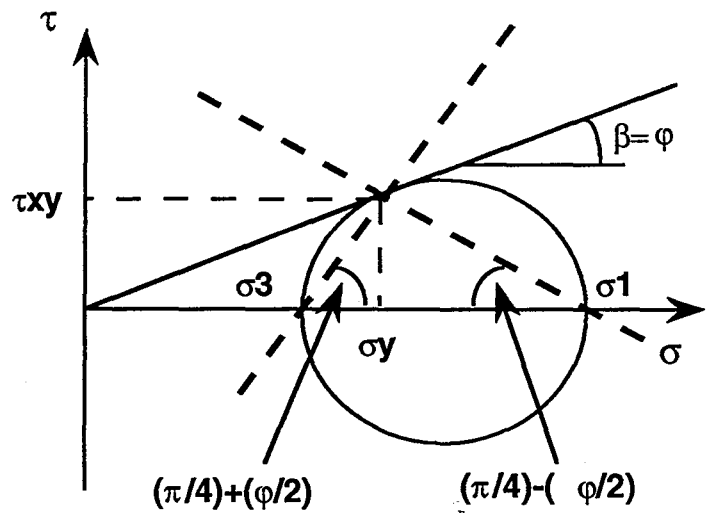
GOGUEL J. (FILLIAT G., 1981 [54]) a étudié la répartition des contraintes sous un versant plan indéfini dans l'hypothèse d'une relaxation complète des contraintes; il admet une déformation permanente à volume constant de type visqueux. Les contraintes principales sont alors inclinées à $\frac{\pi}{4}$ sur la surface libre et ont pour valeur :



a : milieu élastique $\nu=1/3$



b : milieu pulvérulent en équilibre limite $\beta=\varphi$



c : hypothèse de la relaxation complète (d'après GOGUEL J.)

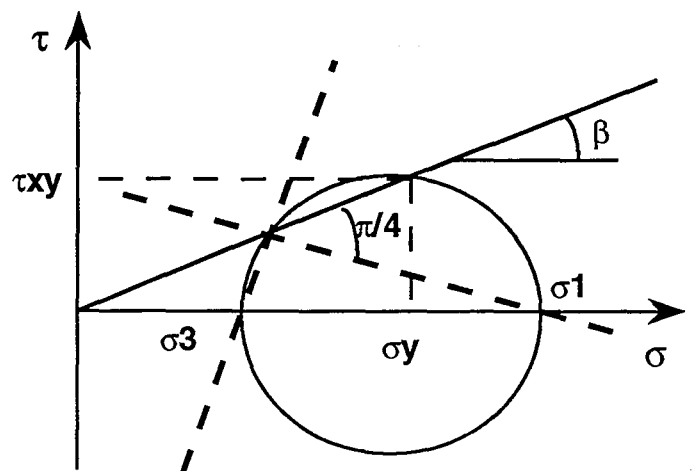


Figure III.4 : Distribution des contraintes sous un versant plan indéfini en déformation plane.

$$\begin{cases} \sigma_1^0 = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta \cdot (1 + \operatorname{tg} \beta) \\ \sigma_2^0 = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta \cdot (1 - \operatorname{tg} \beta) \end{cases}$$

L'examen de ces trois distributions de contraintes également plausibles montre des différences assez sensibles de l'orientation et des valeurs des contraintes principales (figure III.4c). Dans l'hypothèse d'un milieu élastique, il peut apparaître des contraintes de traction pour un versant ayant une pente β telle que :

$$\operatorname{tg}^2 \beta > \frac{\nu}{1 - \nu}$$

$$\nu = 0.2, \operatorname{tg} \beta > 0.5, \beta > 26^\circ 5'$$

$$\nu = 0.5, \operatorname{tg} \beta > 1, \beta > 45^\circ$$

Les contraintes de traction apparaissent pour $\beta = 45^\circ$ dans l'hypothèse de la relaxation complète à volume constant.

2.2.2. Calcul numérique

a) Comment choisir les conditions aux limites ?

Dans un modèle numérique l'estimation des contraintes initiales avant creusement des excavations dépend énormément des conditions aux limites du modèle. Pour minimiser l'effet de bord, les dimensions du modèle doivent être 5 à 10 fois la zone d'intérêt (AL HEIB M., 1994 [42]; ARIF I., 1991 [46]; OMRACI K., 1996 [82]). Dans notre modèle, nous avons pris horizontalement 600 m et 500 m verticalement, soit 5 à 6 fois les dimensions de l'ensemble des ouvrages modélisés. A la base du modèle, les déplacements verticaux sont nuls. Sur les limites latérales, les déplacements horizontaux sont également nuls (figure III.5).

b) Comment tenir compte du versant rocheux ?

Nous avons pris tout d'abord une configuration plane du terrain, phase pour laquelle le terrain n'ayant subi aucun mouvement tectonique ni érosif (figure III.5). Ce modèle permet de calculer un tenseur de contraintes $[\sigma_0]$. Ensuite en "excavant" la vallée, on trouve un nouvel tenseur de contraintes $[\sigma_0] + \Delta[\sigma]$. Cette deuxième étape tient compte de la première en appliquant des forces de déconfinement sur toute la surface créée par la partie "excavée".

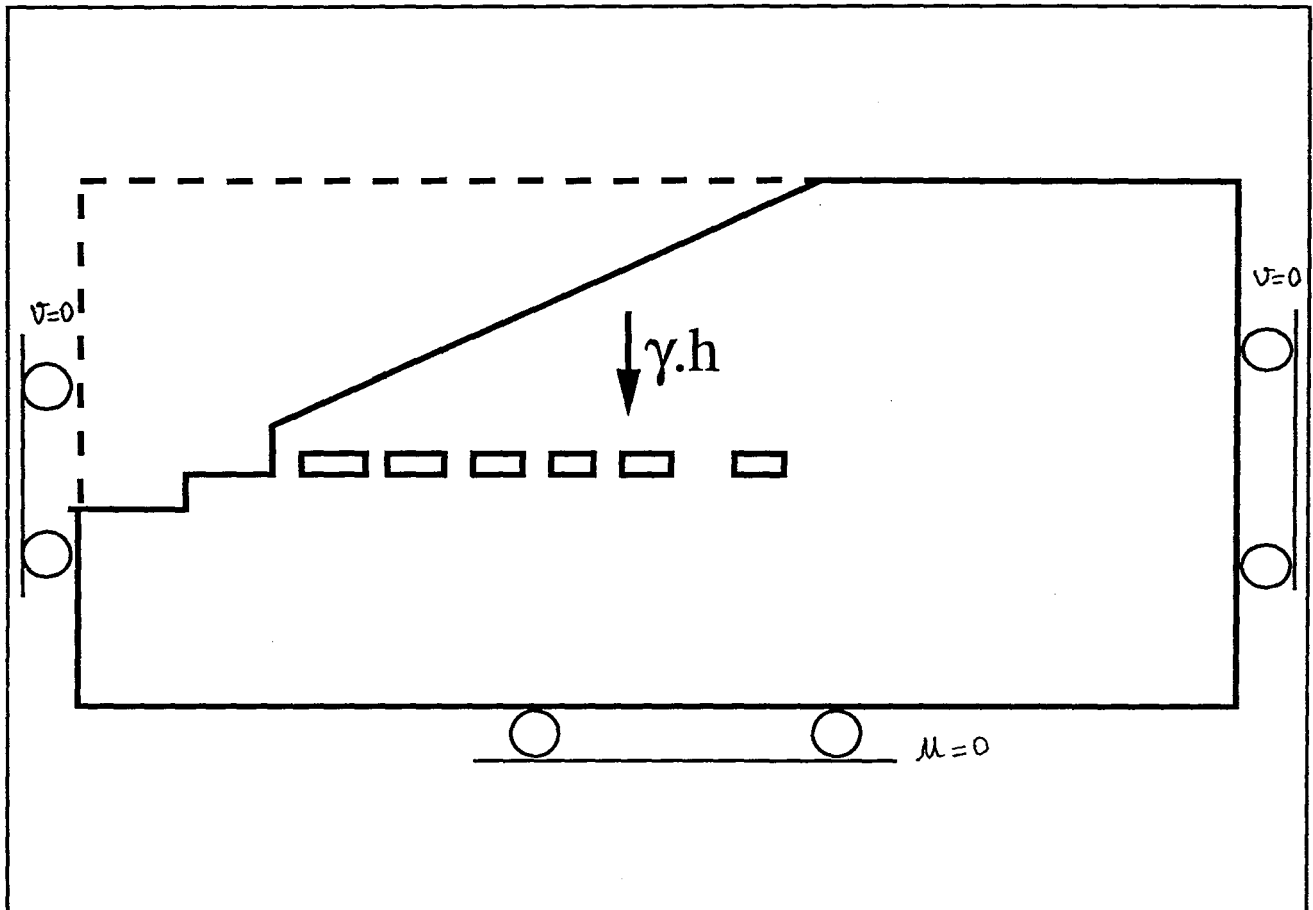
Cette démarche numérique vise essentiellement la compréhension de l'état de contraintes dites "initiales" en présence d'un flanc de coteau. Nous avons retenu deux résultats intéressants. Le premier concerne la déviation du tenseur des contraintes principales sous la pente qui peut atteindre 40° . Le deuxième concerne le degré de cisaillement de la zone exploitée. A la base du flanc de coteau, le cisaillement est de l'ordre de 0.2 MPa (figure III.6).

c) Conclusion

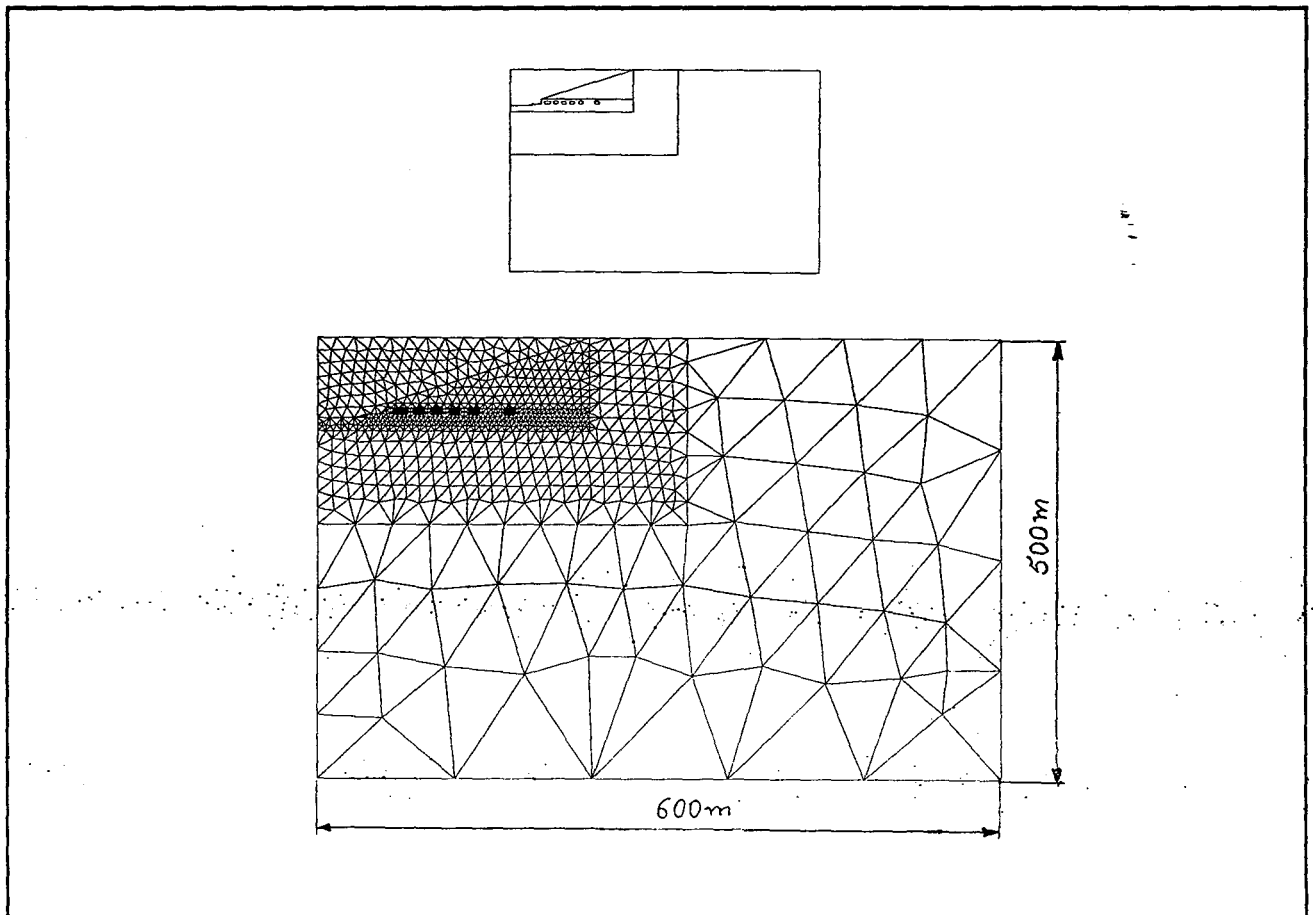
Avant l'exploitation de la carrière, le flanc de coteau engendre des fortes contraintes de cisaillement dans le terrain.

Ce calcul préliminaire représente l'étape de base de notre démarche dite "par phases". Le cumul des résultats d'une phase à une autre permet de bien localiser les zones à risque dans le modèle.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



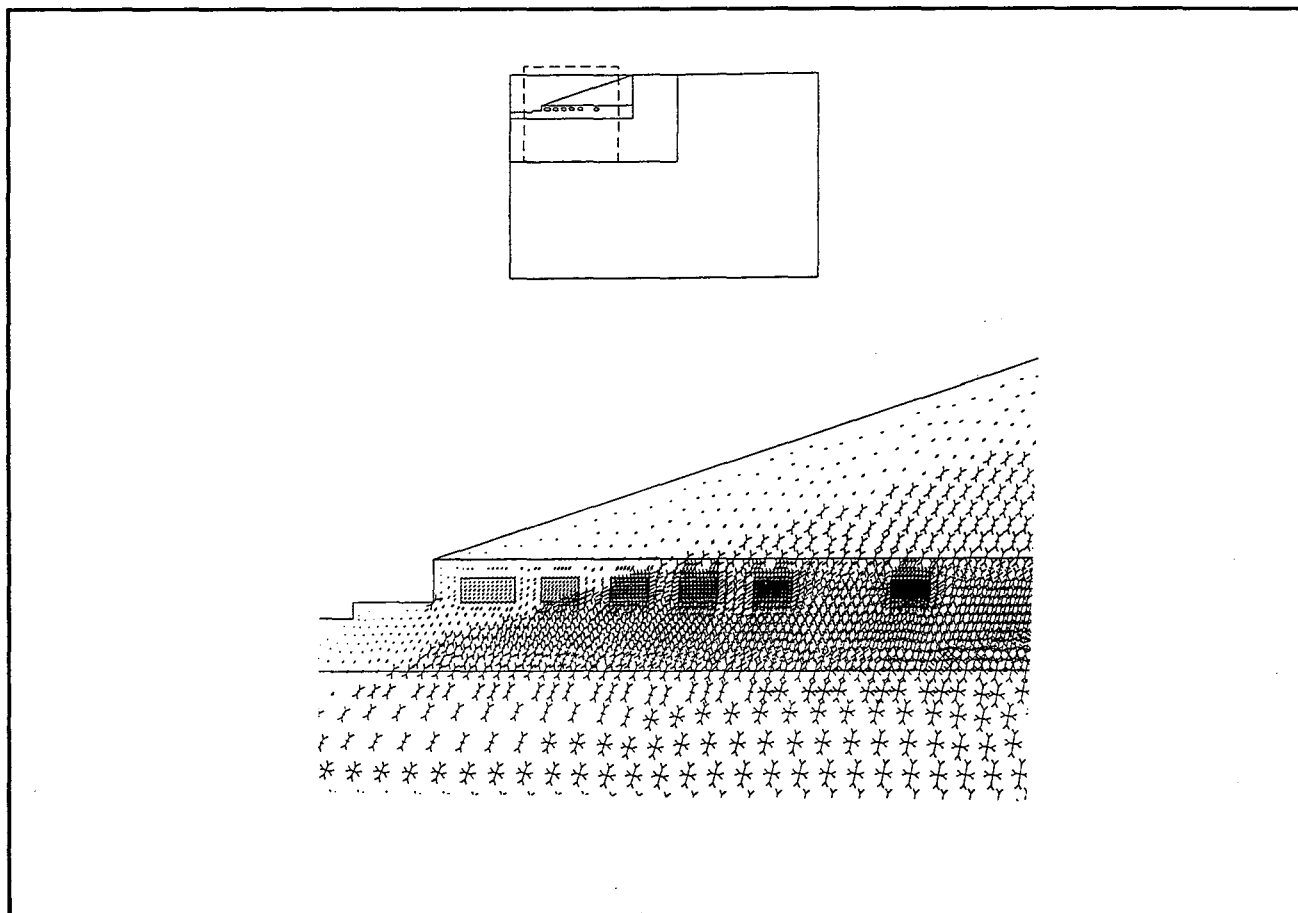
a : Conditions aux limites du modèle.



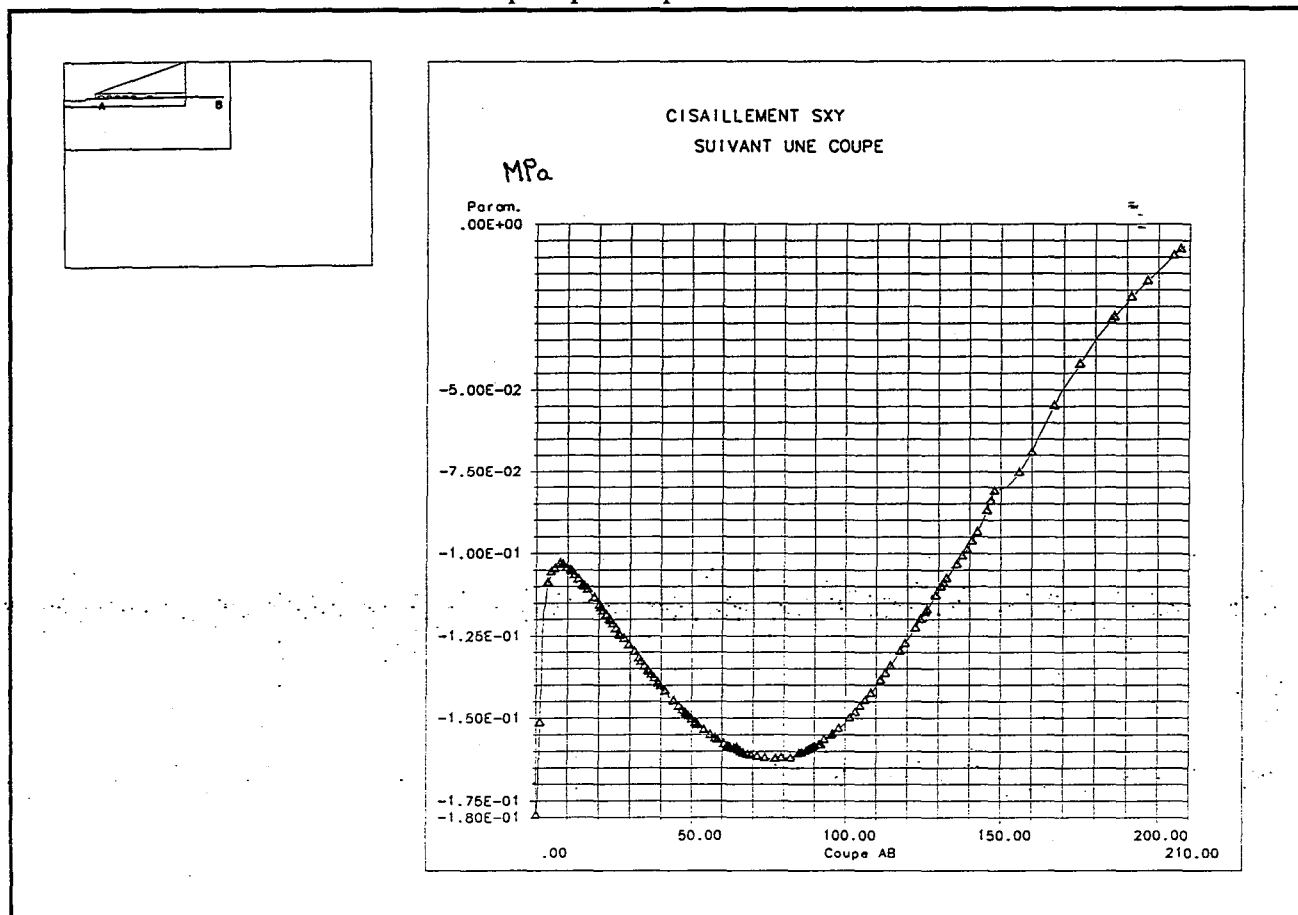
b : Configuration plane avant flanc de coteau.

Figure III.5 : Conditions aux limites et choix de l'état initial.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



a : Contraintes principales en présence du flanc de coteau.



b : Variation de contrainte de cisaillement en présence du flanc de coteau.

Figure III.6 : L'effet du flanc de coteau sur la répartition des contraintes.

2.3. Calcul par phases : approche par éléments finis

2.3.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons modéliser des carrières complexes tout en analysant l'effet de versant sur la stabilité des ouvrages souterrains. Dans le premier exemple, nous insistons sur le calcul par phases en tenant compte de la phase avant "creusement du versant". Dans le deuxième exemple, nous simulons la reprise de l'exploitation au mur de la carrière et leur effet sur la stabilité de l'ensemble des ouvrages.

2.3.2. Phasage des travaux

La méthodologie complète adoptée pour la résolution du problème de stabilité d'une carrière souterraine sous un flanc de coteau est schématisée sur la figure III.7. On note quand même que la règle de calcul suivie est applicable dans tous les cas (modèles continus ou discontinus).

Nous avons procédé par un calcul par phases, c'est-à-dire, calcul des contraintes initiales sans la pente naturelle, réinitialisation des contraintes due au versant et simulation des excavations par phases.

Le dernier point est traité de deux manières en tenant compte du sens de l'exploitation, soit du flanc de coteau vers le fond de la carrière, soit du fond de la carrière vers le flanc de coteau.

Cette méthode de calcul dite "par phases" permet de cumuler les contraintes et les déplacements dans les ouvrages en simulant des excavations successives. Cette simple démarche donne des résultats proches de la réalité.

2.3.3. Résultats et interprétations

a) Carrière sous un flanc de coteau : premier exemple

Sur la figure III.8, nous présentons les traces des contraintes principales selon les deux sens d'exploitation. Dans les deux cas, nous pouvons observer une déviation de la contrainte principale majeure par rapport à la verticale de l'ordre de 40°. L'exploitation du flanc de coteau vers le fond de la carrière augmente la sollicitation dans les piliers au voisinage de l'entrée de la carrière.

Nous allons maintenant interpréter les points plastiques en fonction des phases du calcul. Ces points indiquent les zones du modèle qui peuvent dépasser le critère de rupture. Pour un bon raisonnement vis-à-vis de la recherche d'un mécanisme de rupture lié à cette carrière souterraine, nous avons simulé plusieurs conduites d'exploitation. Nous avons introduit deux cas d'exploitation, du fond de la carrière vers le flanc de coteau et du flanc de coteau vers le fond de la carrière.

Dans le cas d'une exploitation du flanc de coteau vers le fond de la carrière et après consolidation selon la coupe B-B (voir figure III.1), l'ouverture des quatre premières chambres l'une après l'autre ne fait pas apparaître de points plastiques. L'ouverture de la cinquième galerie engendre des points plastiques dans les piliers les plus proches de l'entrée de la carrière (figure III.9). L'ouverture de la sixième galerie augmente le nombre de points plastiques dans la même zone ce qui explique l'apparition des fractures mécaniques dans les piliers.

Selon la coupe A-A (voir figure III.1), la situation est moins critiquée grâce à la présence d'un grand pilier au pied du flanc (figure III.10).

Dans le cas d'une exploitation du fond de la carrière vers le flanc de coteau, les points plastiques n'apparaissent pas dans les piliers proches de l'entrée de la carrière, mais ceux qui sont dans le fond de la carrière sont plus sollicités. Ce résultat est très intéressant et peut aider l'exploitant à choisir par où commencer l'exploitation pour assurer une bonne stabilité des ouvrages dans des carrières souterraines sous un flanc de coteau (figure III.11).

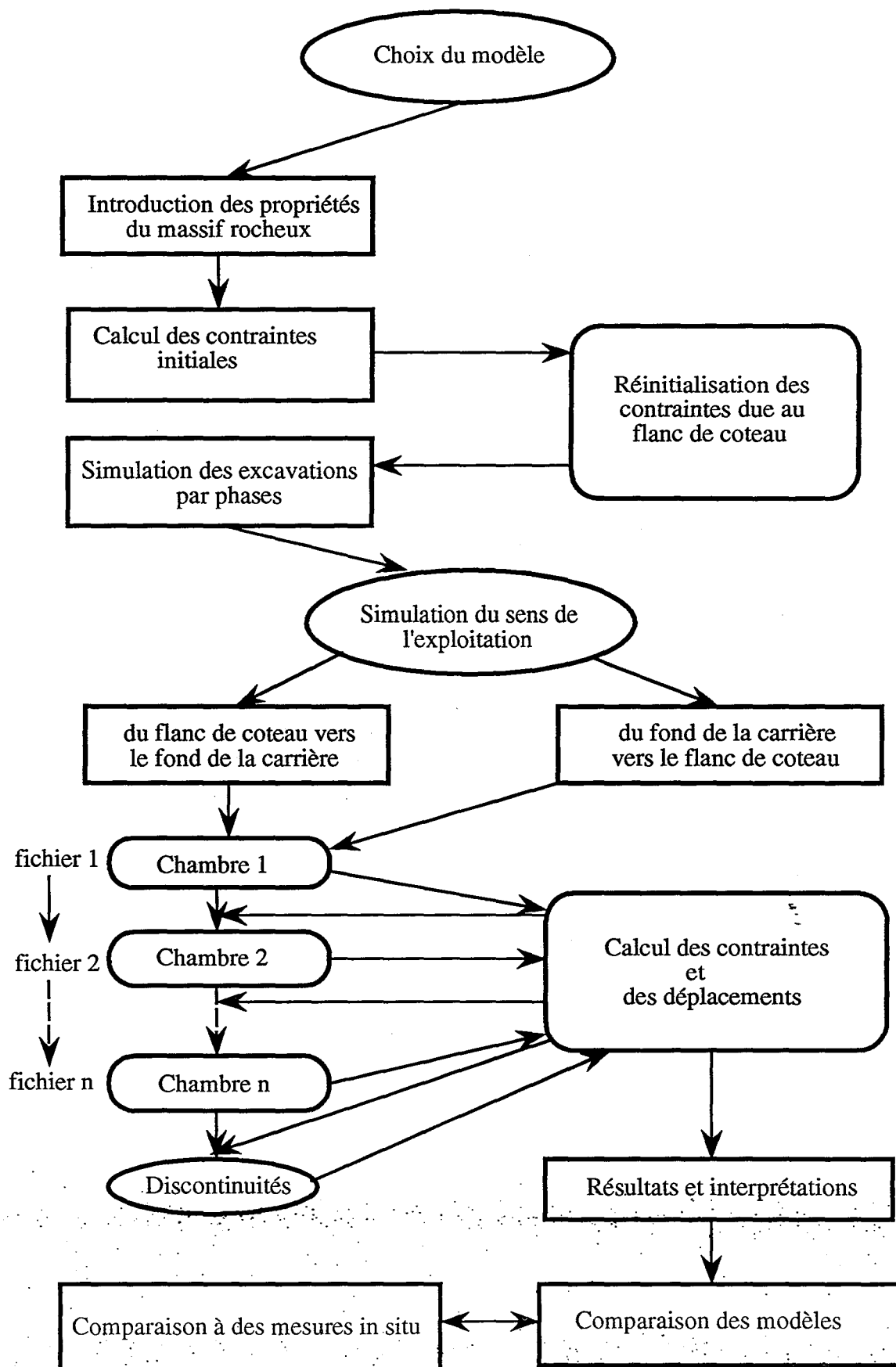
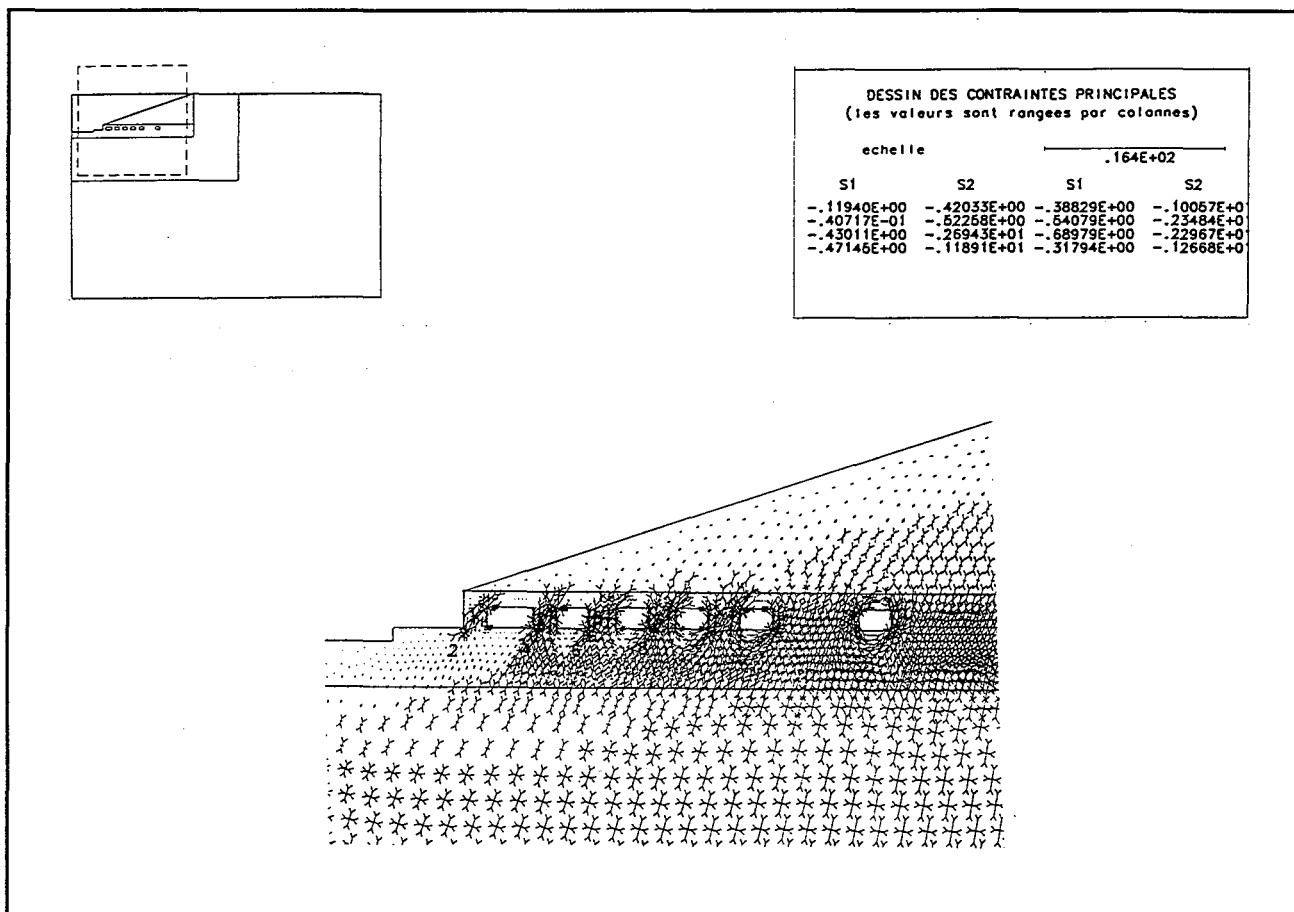
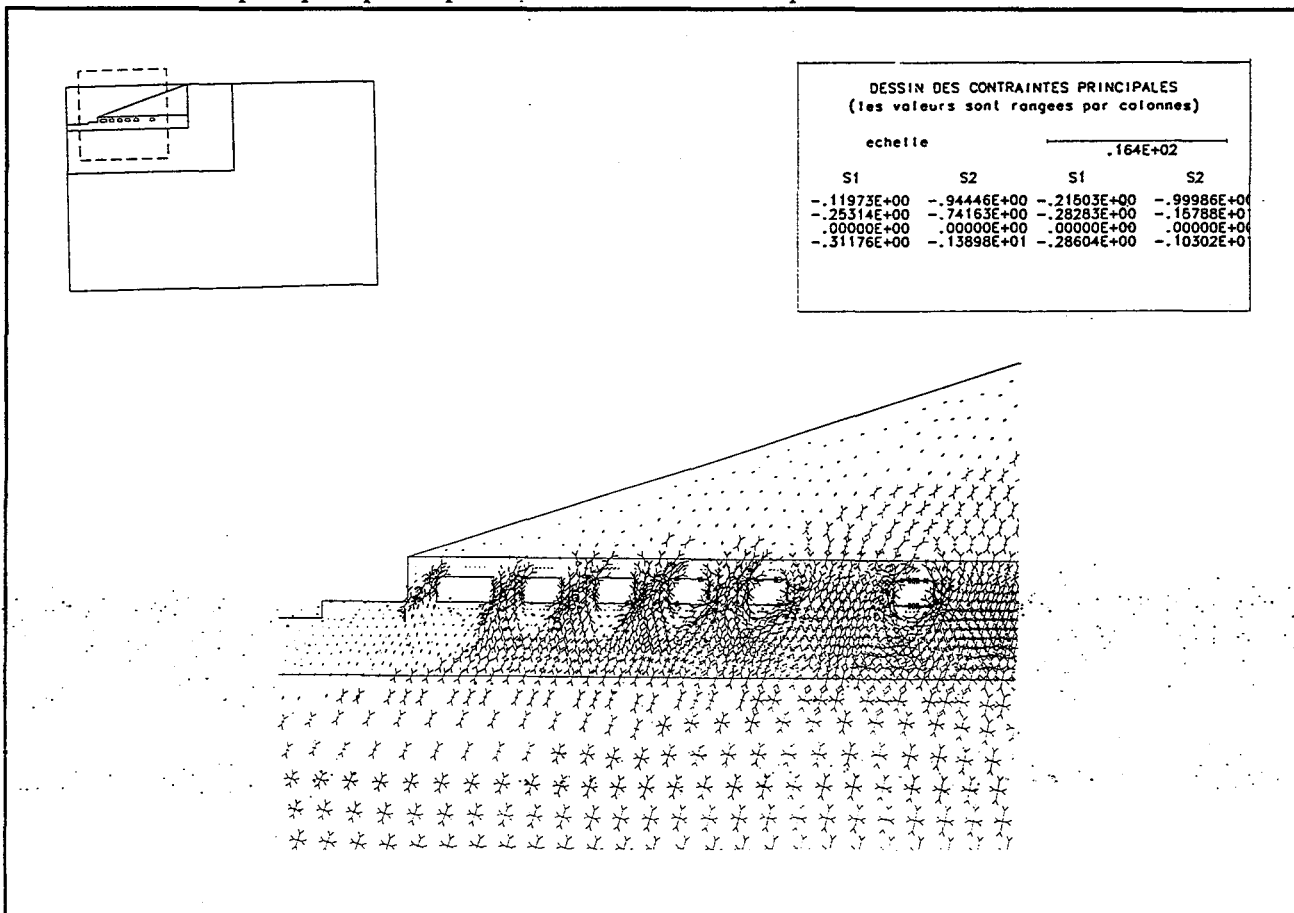


Figure III.7 : Méthodologie du calcul par modèles numériques

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



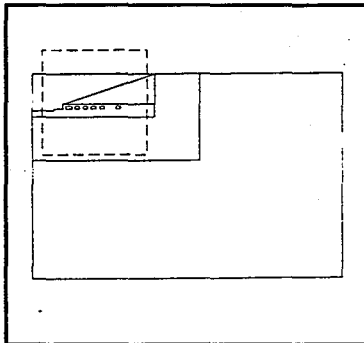
a : Contraintes principales pour la phase finale dans le cas d'une exploitation du flanc de coteau vers le fond.



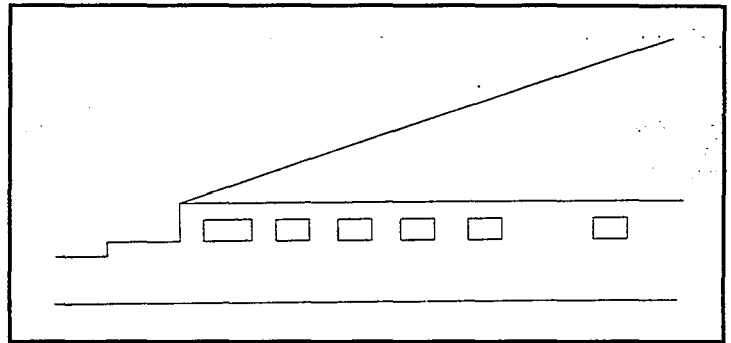
b : Contraintes principales pour la phase finale dans le cas d'une exploitation du fond vers le flanc de coteau.

Figure III.8 : Contraintes principales selon le sens d'exploitation.

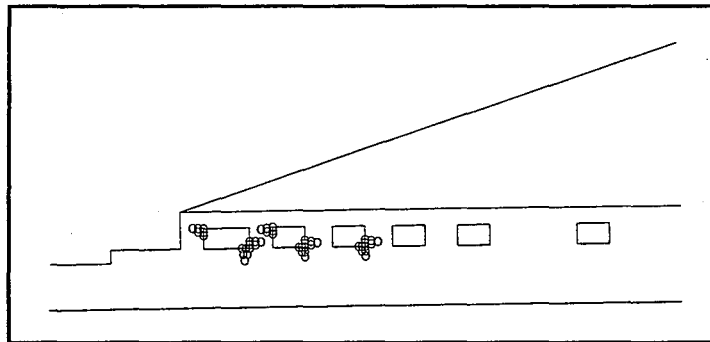
Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



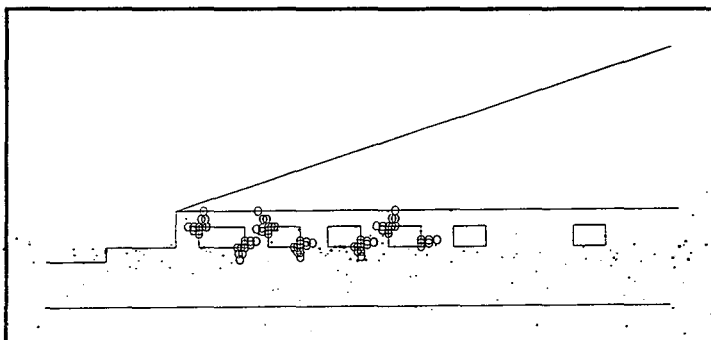
Modèle complet



a : Absence des points plastiques
après creusement de la 4ème galerie



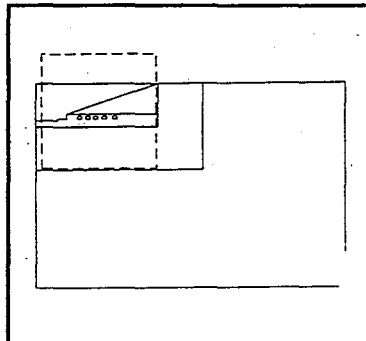
b : Points plastiques après creusement de la 5ème galerie



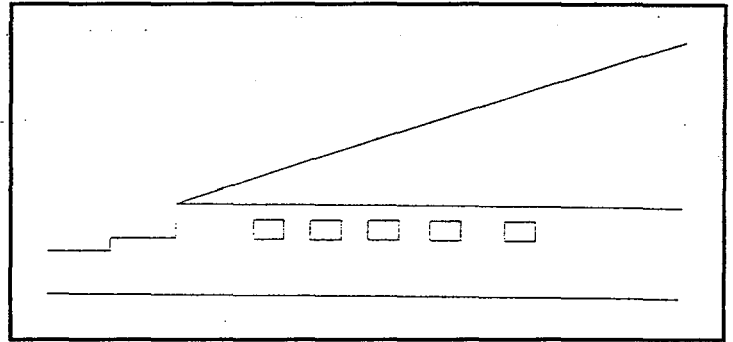
c : Points plastiques en phase finale.

Figure III.9 : Traces des points plastiques coupe A-A, du flanc de coteau vers le fond.

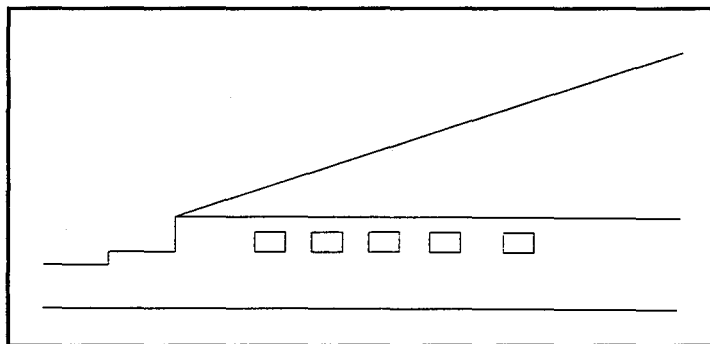
Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



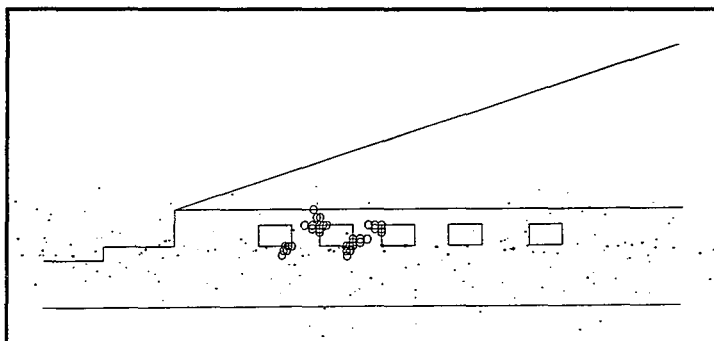
Modèle complet



a : Absence des points plastiques après creusement de la 3ème galerie



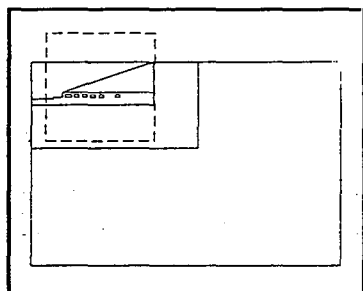
b : Absence des points plastiques après creusement de la 4ème galerie



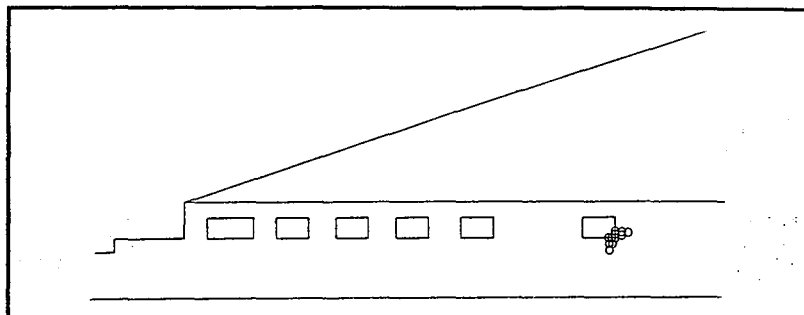
c : Points plastiques en phase finale.

Figure III.10 : Traces des points plastiques coupe B-B, du flanc de coteau vers le fond.

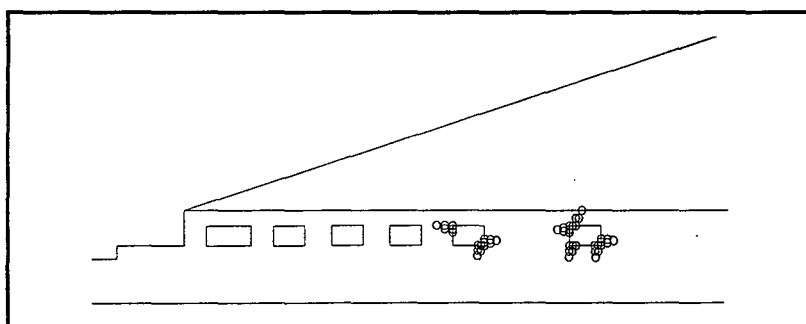
Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



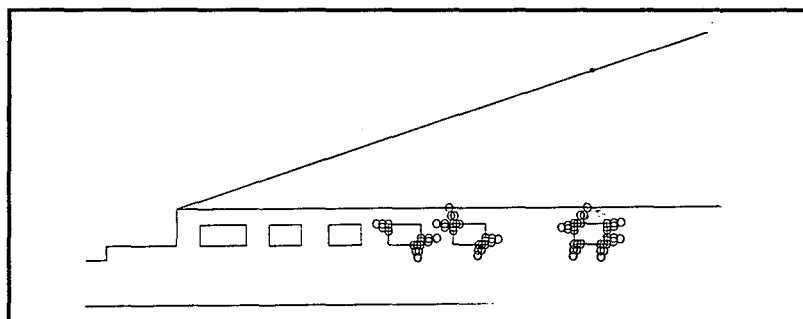
Modèle complet



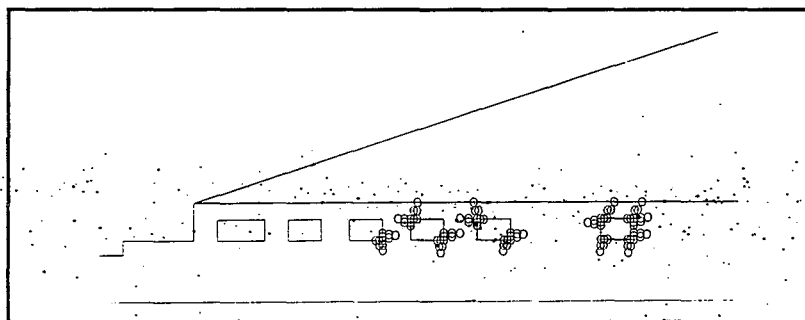
a : Points plastiques après creusement de la 3ème galerie



b : Points plastiques après creusement de la 4ème galerie



c : Points plastiques après creusement de la 5ème galerie



d : Points plastiques en phase finale.

Figure III.11 : Traces des points plastiques coupe A-A, du fond vers le flanc de coteau.

b) Carrière sous une falaise : deuxième exemple

Comme dans le cas précédent, nous avons conservé la même démarche en ce qui concerne le phasage du calcul. Nous avons procédé de la manière suivante :

- consolidation du modèle pour obtenir l'état initial avant l'exploitation de la carrière,
- excavation de la carrière jusqu'à l'état actuel, galerie par galerie tout en exploitant une couche de craie de 4.5 m de puissance, l'exploitation se fait de la base de la falaise vers le fond de la carrière,
- reprise de l'exploitation au mur en revenant du fond de la carrière vers la base de la falaise, cas critique pour la stabilité globale. La puissance totale de la couche ou des couches exploitées devient alors 7.5 m.

Une coupe a été choisie pour modéliser la zone la plus régulière dans la carrière et où l'exploitation a été reprise partiellement au fond de la carrière. Cette coupe permet de tenir compte de la falaise (figure III.12). Les caractéristiques mécaniques du modèle sont indiquées dans le tableau III.2.

Les conditions aux limites sont présentées sur la figure III.12a ainsi que les dimensions du modèle. Sur les limites latérales, nous imposons des déplacements horizontaux nuls. Sur la base du modèle le déplacement vertical est aussi nul.

Nous avons choisi une seule couche pour toutes les phases de calcul sans tenir compte des couches minces observées sur les parois des piliers. Nous avons choisi aussi les caractéristiques les plus faibles pour tenir compte de la dégradation dans la carrière (tableau III.2).

En ce qui concerne le maillage, nous avons choisi des triangles à six noeuds pour plus de précision. Le nombre total d'éléments est de 1972, le nombre total de noeuds est de 4031. La zone d'intérêt nécessite un maillage assez fin pour mieux estimer les contraintes (figure III.12b).

Les phases d'excavation (avant reprise) montrent une propagation des points plastiques vers le fond de la carrière (figure III.13). La sixième et la dernière phase montre une forte concentration des points plastiques autour des piliers proches de la falaise (figure III.14). L'état actuel de la carrière est loin d'être en sécurité.

La reprise d'exploitation montre que le fond de la carrière devient très chargé, autrement dit les piliers se déstabilisent du fait que leur élancement augmente et le phénomène de traction augmente aussi au voisinage des parois. La phase finale en tenant compte de la reprise indique une forte concentration des points plastiques autour de tous les piliers (figure III.15).

2.3.4. Conclusion

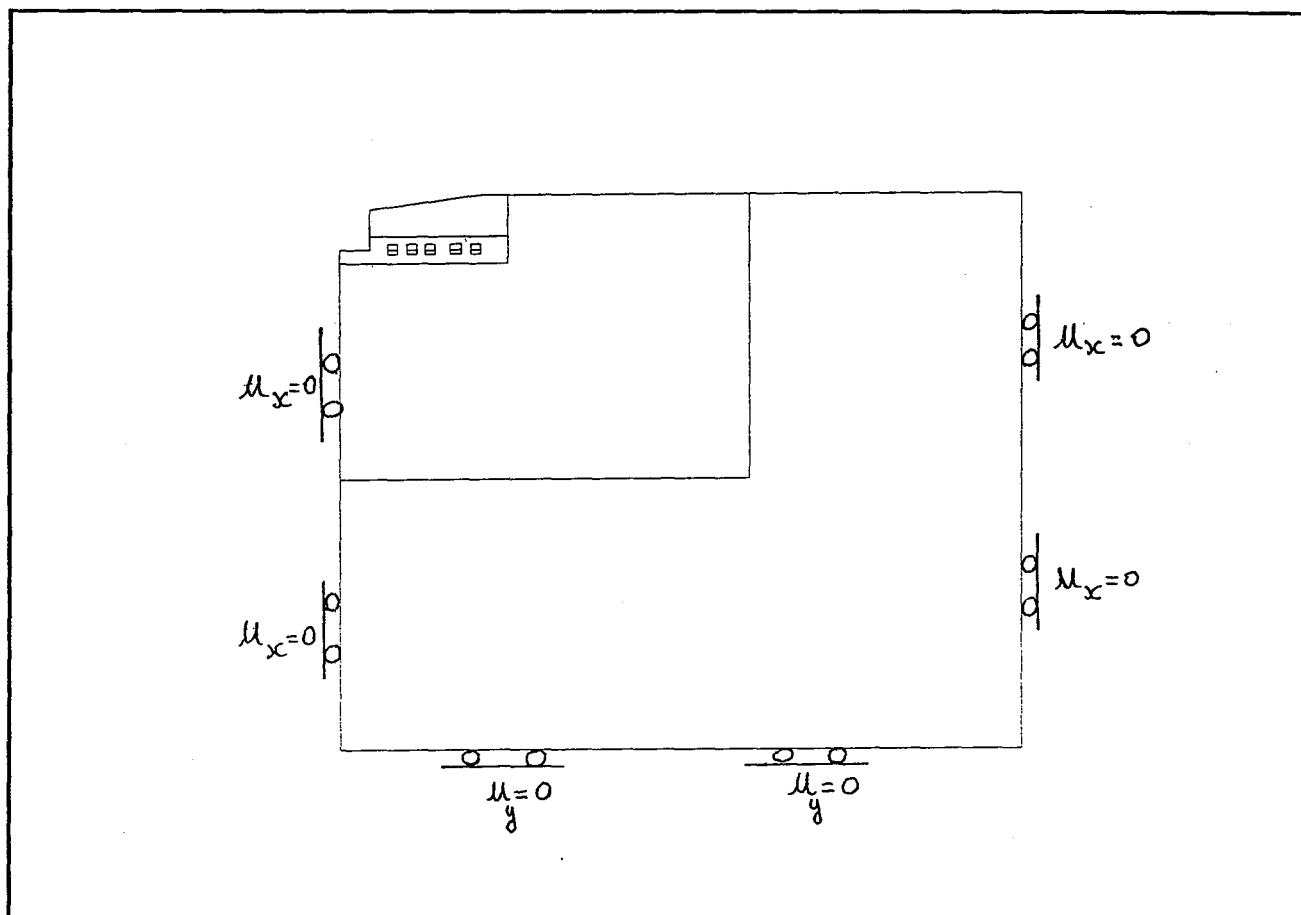
Malgré la simplicité et les hypothèses du modèle par éléments finis, nous avons réussi à trouver une explication plausible des phénomènes observables.

Cette étude par éléments finis en ce qui concerne le premier exemple, prévoit en quelque sorte les zones à risques dans la carrière souterraine et explique les mécanismes de rupture qui peuvent affecter les piliers dans des zones particulières de la carrière d'une manière globale.

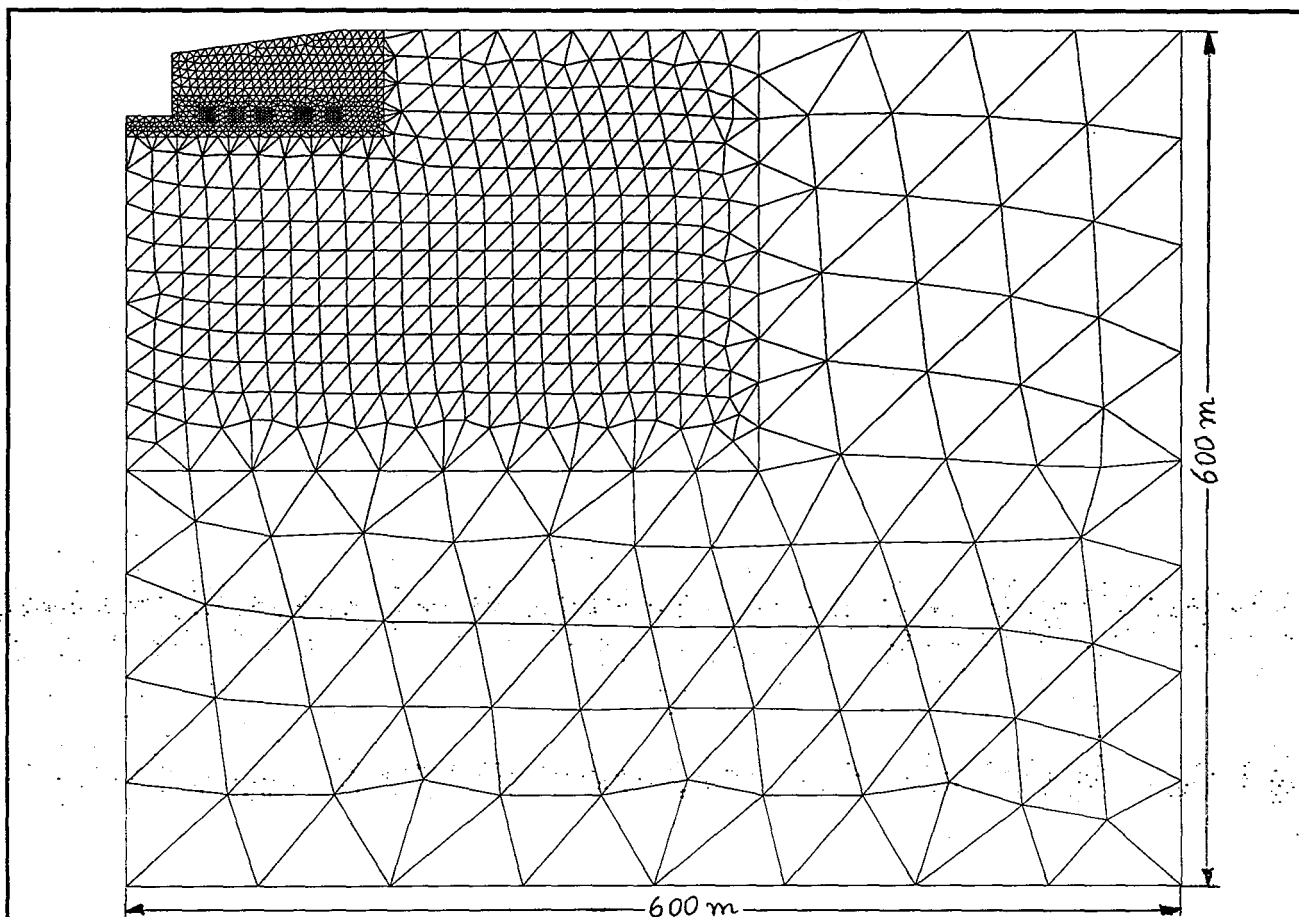
La présence d'un flanc de coteau surcharge les piliers au voisinage de l'entrée et dévie le repère principale de contraintes par rapport à la verticale, ce qui favorise le cisaillement au sein des piliers selon des plans horizontaux et verticaux.

Les points plastiques lors de la dernière phase de l'exploitation du flanc de coteau vers le fond de la carrière indiquent les endroits les plus sollicités de ces piliers et qui sont bien ceux qui ont subi une fracturation mécanique.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



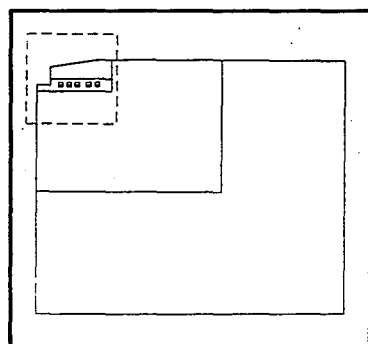
a : Conditions aux limites du modèle.



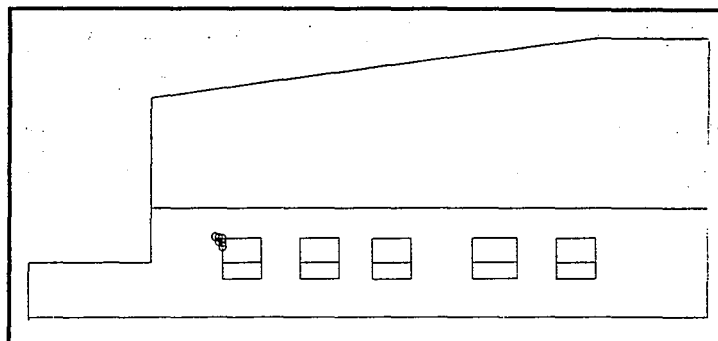
b : Maillage adopté.

Figure III.12 : Conditions aux limites et maillage (Vernon).

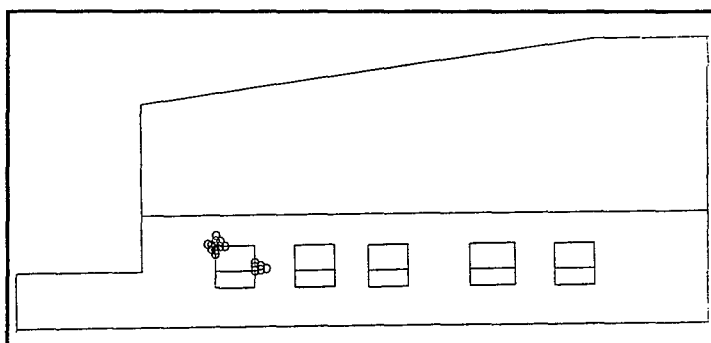
Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



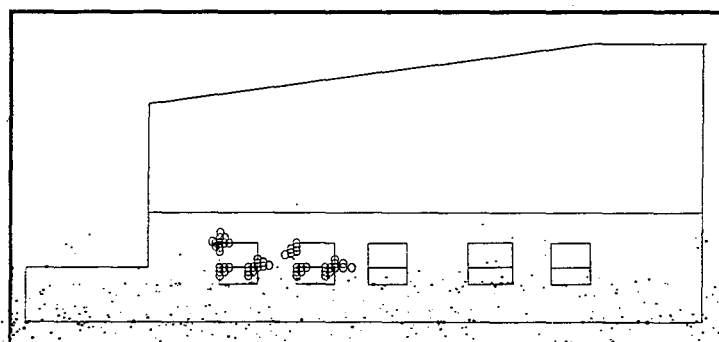
Modèle complet



a : Points plastiques après creusement de la 1^{ère} galerie



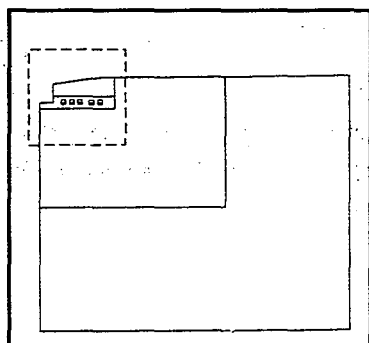
b : Points plastiques après creusement de la 2^{ème} galerie



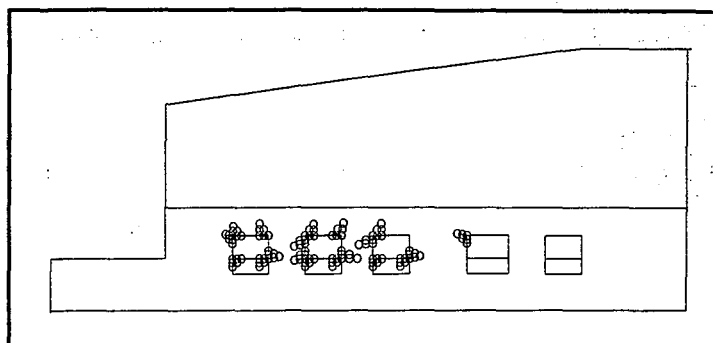
c : Points plastiques après creusement de la 3^{ème} galerie

Figure III.13 : Traces des points plastiques, phases de creusement.

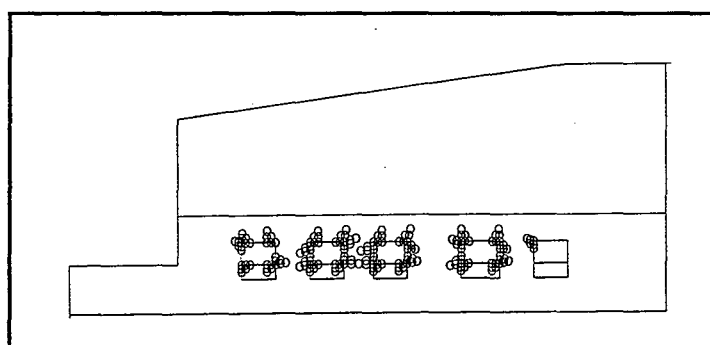
Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



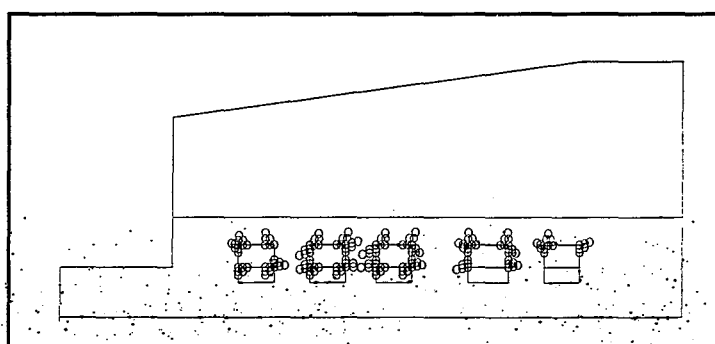
Modèle complet



a : Points plastiques après creusement de la 4ème galerie



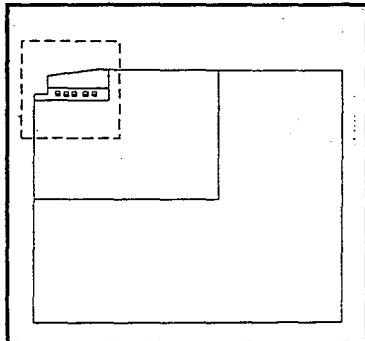
b : Points plastiques après creusement de la 5ème galerie au fond



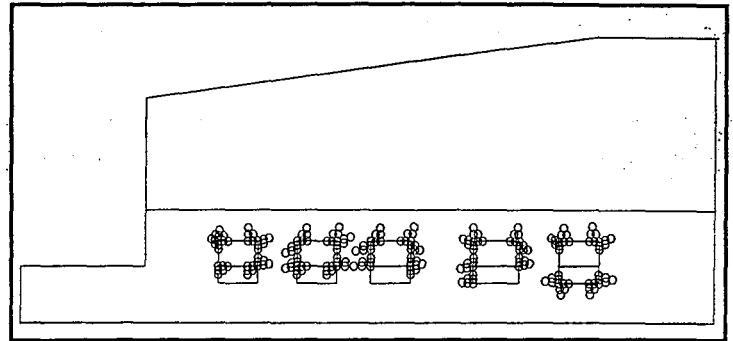
c : Points plastiques après reprise de la 5ème galerie au fond

Figure III.14 : Traces des points plastiques, phases de creusement et de reprise.

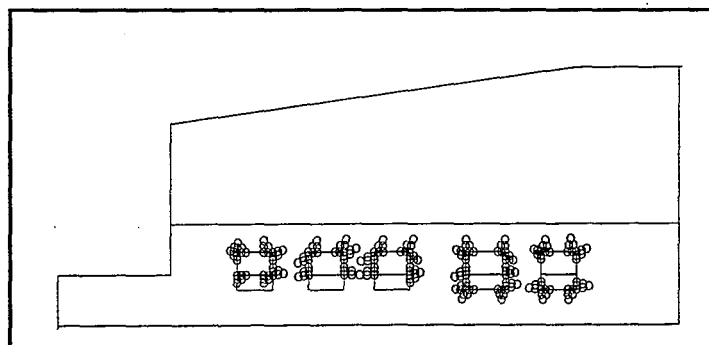
Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



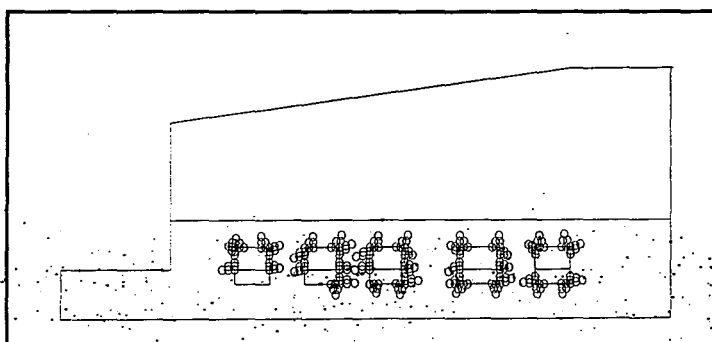
Modèle complet



a : Points plastiques, reprise de la 4ème galerie au fond



b : Points plastiques, reprise de la 3ème galerie



c : Points plastiques, reprise de la 2ème et 1ère galerie, phase finale

Figure III.15 : Traces des points plastiques, phases de reprise.

Une exploitation du fond de la carrière vers le flanc de coteau pourrait selon le modèle limiter les fractures mécaniques observées.

Dans le deuxième exemple le calcul par éléments finis par phases montre que cette dernière est stable dans son état actuel mais toujours il faut contrôler l'état des piliers proches de la falaise.

Dans l'état futur de la carrière si on exploite davantage au niveau du mur jusqu'à la base de la falaise, nous pouvons attendre des instabilités au fond comme au voisinage de la falaise par une nouvelle sollicitation des ouvrages.

2.4. Comment focaliser l'analyse sur un domaine particulier ?

2.4.1. Introduction

Il est intéressant de réaliser un modèle à petite échelle dans une zone bien particulière d'un grand modèle, en intégrant toutes les couches par exemple. Ce modèle permet de mieux estimer le tenseur des contraintes dans les piliers. Ce modèle dit "LOUPE" nécessite la prise en compte des conditions initiales et les conditions aux limites suite à un calcul à grande échelle.

Nous avons pensé à focaliser l'analyse sur une zone bien déterminée du grand modèle dite "modèle à petite échelle". Le calage de ce dernier se fait à partir du grand modèle en tenant compte des résultats des déplacements (figure III.16). Ce modèle à petite échelle a pour avantages :

- il est constitué d'un maillage beaucoup plus dense et permet donc un calcul beaucoup plus précis,
- il tient compte des couches minces qui sont difficilement introduites dans le grand modèle. Par exemple la présence des couches minces au sein des piliers,
- la reprise de l'exploitation au mur de la carrière particulièrement au fond de la carrière ce qui nous permet d'envisager un calcul plus précis.

Dans cette partie, nous présenterons la manière dont nous avons procédé pour réaliser le modèle à petite échelle et ainsi que les principaux résultats préliminaires.

2.4.2. Modèle à petite échelle "LOUPE"

a) Le programme

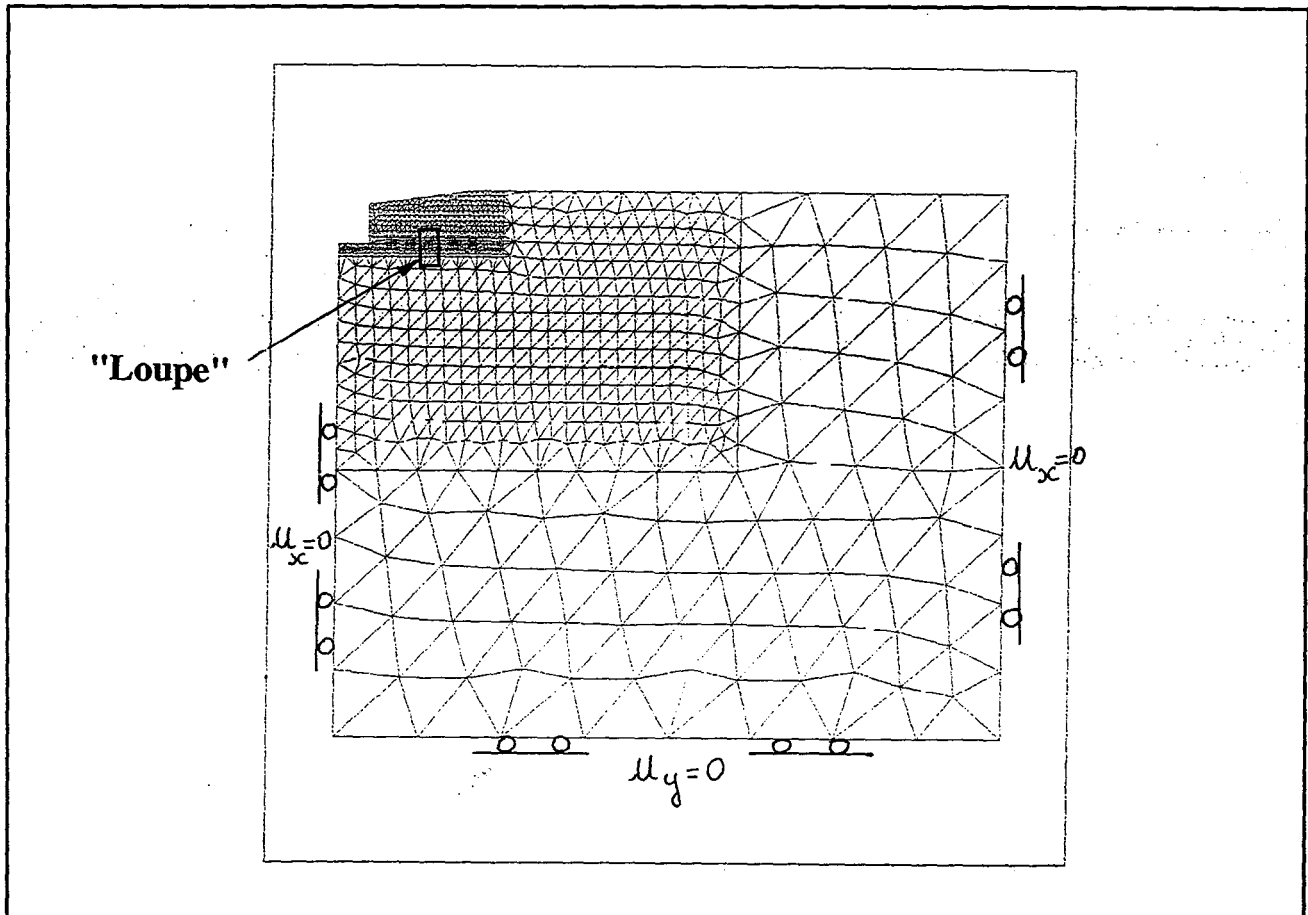
La figure III.17 illustre un organigramme général du programme de calcul. Il s'agit d'une procédure indépendant du code de calcul CESAR-LCPC capable de lire et écrire les informations du petit modèle sous forme d'un fichier identifiable par CESAR.

Connaissant le nombre des éléments et le nombre des noeuds des deux modèles à la fois qui sont bien entendu créés par CESAR-LCPC lui même, le programme commence par un test sur l'appartenance des noeuds du petit modèle dans des éléments du grand modèle.

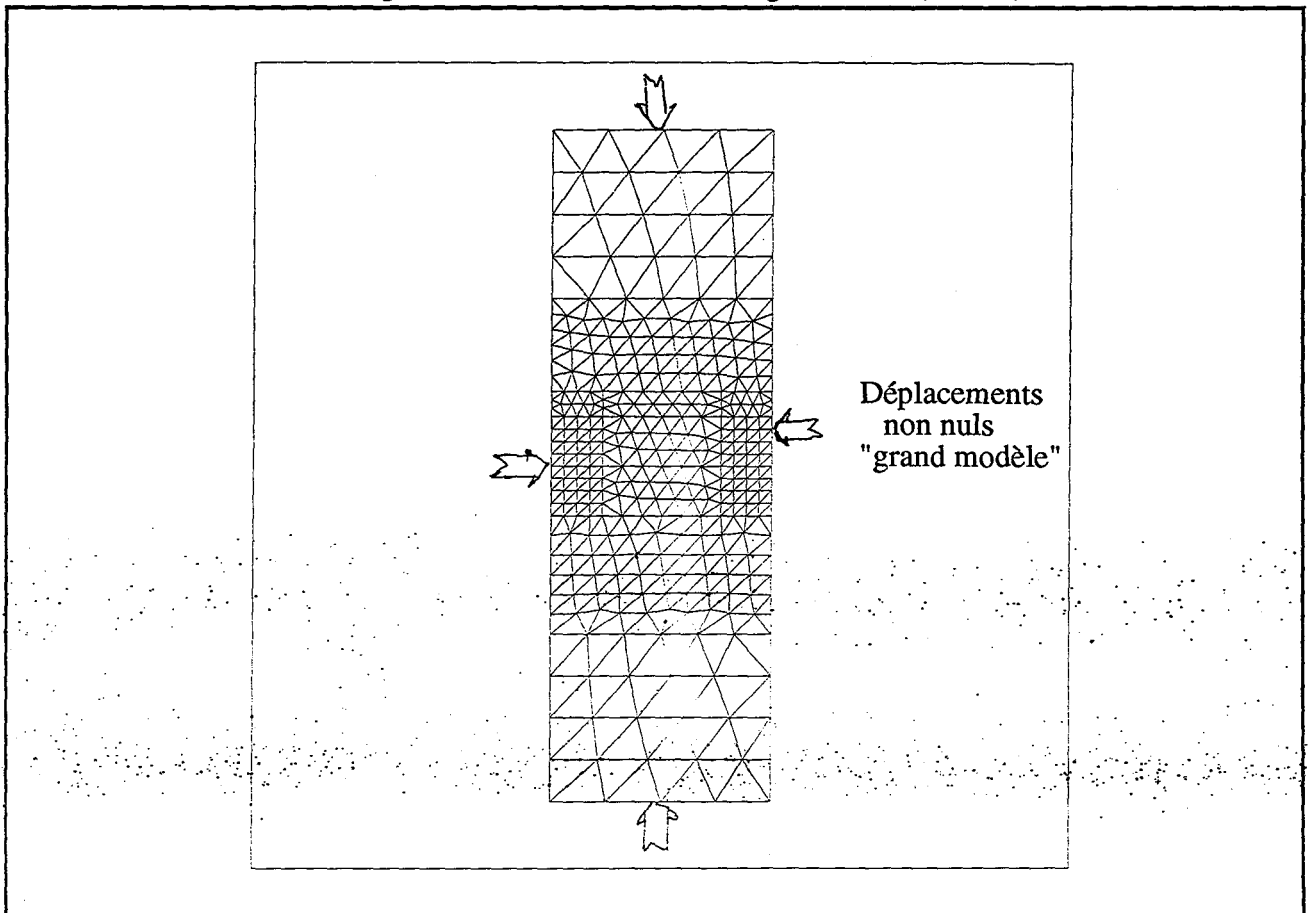
Une fois ce test réussi, on calcule les inconnues principales par des interpolations linéaires en choisissant des éléments de référence.

Un dernier test se fait de nouveau sur les noeuds du petit modèle, si tout ça marche bien, on prépare des fichiers utilitaires pour les résultats de calcul, les conditions aux limites du modèle, du chargement et de reprise pour un calcul par phases.

L'une des difficultés de ce programme est d'imposer des conditions aux limites du petit modèle en se basant sur les résultats du grand modèle. Nous avons pris comme conditions, des déplacements non nuls sur les limites du modèle.



a : Maillage et conditions aux limites dans le grand modèle (CESAR).



b : Maillage et conditions aux limites dans le petit modèle (CESAR).

Figure III.16 : Maillages et conditions aux limites dans les deux modèles (Vernon).

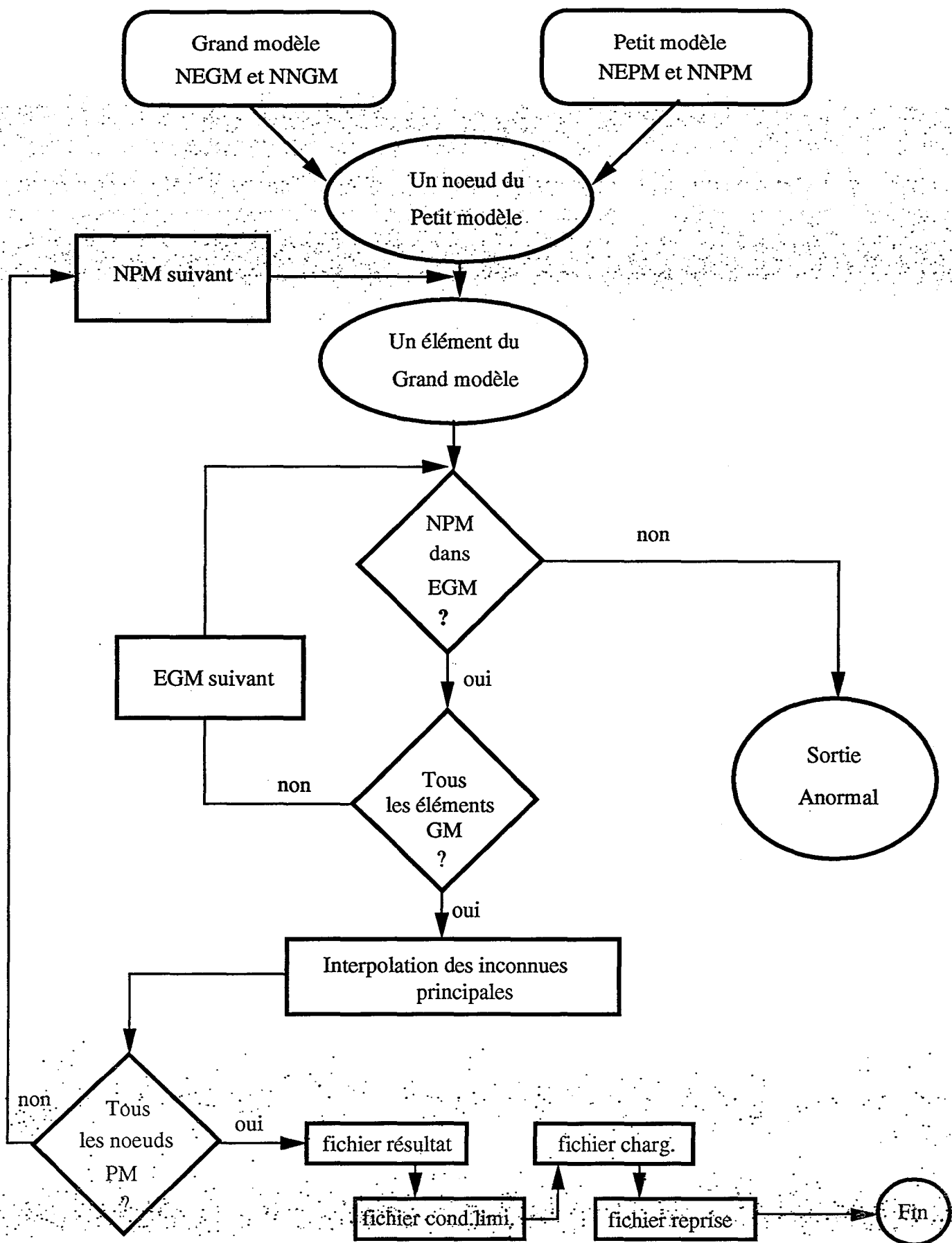


Figure III.17 : Organigramme simplifié du programme "LOUPE"

Nous avons pris en compte dans ce programme que le calcul en élasticité linéaire (la loi de Hooke), faute de temps et des moyens.

C'est un code de calcul par éléments finis qui dépend en partie du code CESAR-LCPC en ce qui concerne :

- le maillage du modèle à petite échelle,
- la visualisation des résultats du calcul par l'intermédiaire de PEGGY (PEG2D).

L'organigramme présenté sur la figure III.17 illustre les différentes étapes à suivre dans le programme pour mener à bien le calcul :

- localisation des noeuds du modèle "LOUPE" dans les éléments du grand modèle,
- lecture du fichier de résultats pour une phase déterminée du modèle global,
- calcul des déplacements des noeuds sur les frontières du modèle à petite échelle etc....

b) Les résultats obtenus

Nous avons retenu quelques résultats du premier calcul afin de les comparer avec ceux du grand modèle. Tout d'abord, voyant l'importance du maillage dans le modèle à petite échelle (figure III.16). On peut même multiplier cette densité de maillage par 2 à 5 voire 10 fois (grosses machines).

Sur la figure III.18 et la figure III.19 nous présentons les déformées des modèles dans les deux cas différents (état initial et après exploitation des deux premières galeries). Trois points sur les deux modèles permettent de voir les déplacements verticaux et horizontaux. Les valeurs de déplacements dans le modèle à petite échelle sont plus faibles que celles du grand modèle. Il ne faut pas oublier que le calcul dans le grand modèle est en élastoplasticité, alors que le modèle à petite échelle est purement élastique. On note aussi la même allure de déformée dans les deux modèles par la présence d'une faible pente à la surface.

En ce qui concerne les déplacements verticaux, nous avons choisi les isovaleurs pour une telle comparaison. Les déplacements sont plus importants dans le grand modèle. Les déplacements verticaux sont plus grands au toit de l'excavation dans les deux modèles (convergence) (figure III.20).

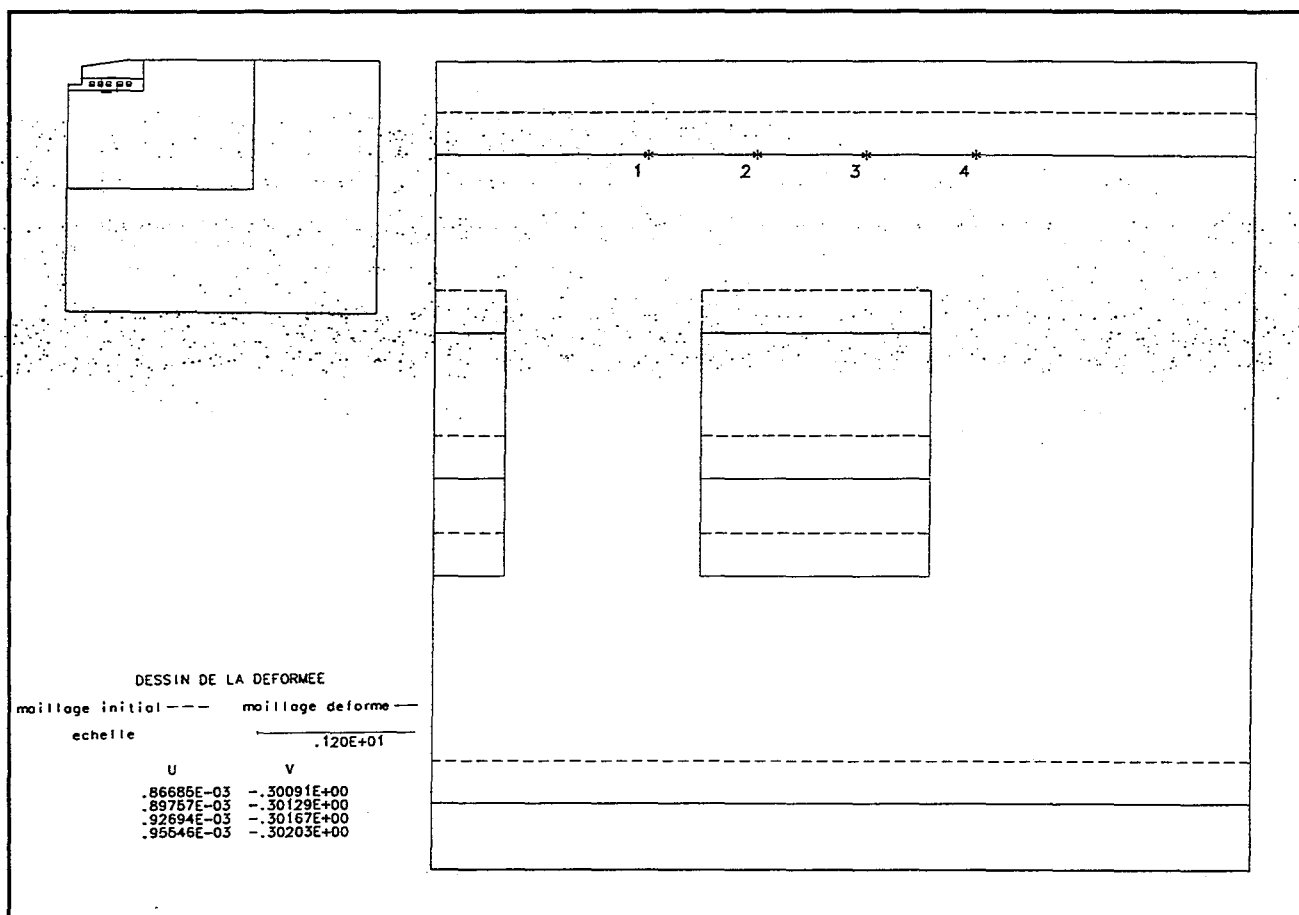
La figure III.21 montre la variation de la contrainte principale majeure au toit de la chambre dans les deux cas. L'allure de la courbe est presque la même. Au toit, il apparaît des contraintes en traction de très faibles valeurs dans le grand modèle, alors que dans le modèle "LOUPE", les contraintes sont en compression.

Sur les bords des piliers, la contrainte principale majeure est en compression avec des valeurs légèrement fortes en compression en comparaison avec celles au toit de la chambre. Malgré le calcul en élasticité du modèle à petite échelle, les valeurs de contrainte principale majeure extrêmes sont proches dans les deux modèles.

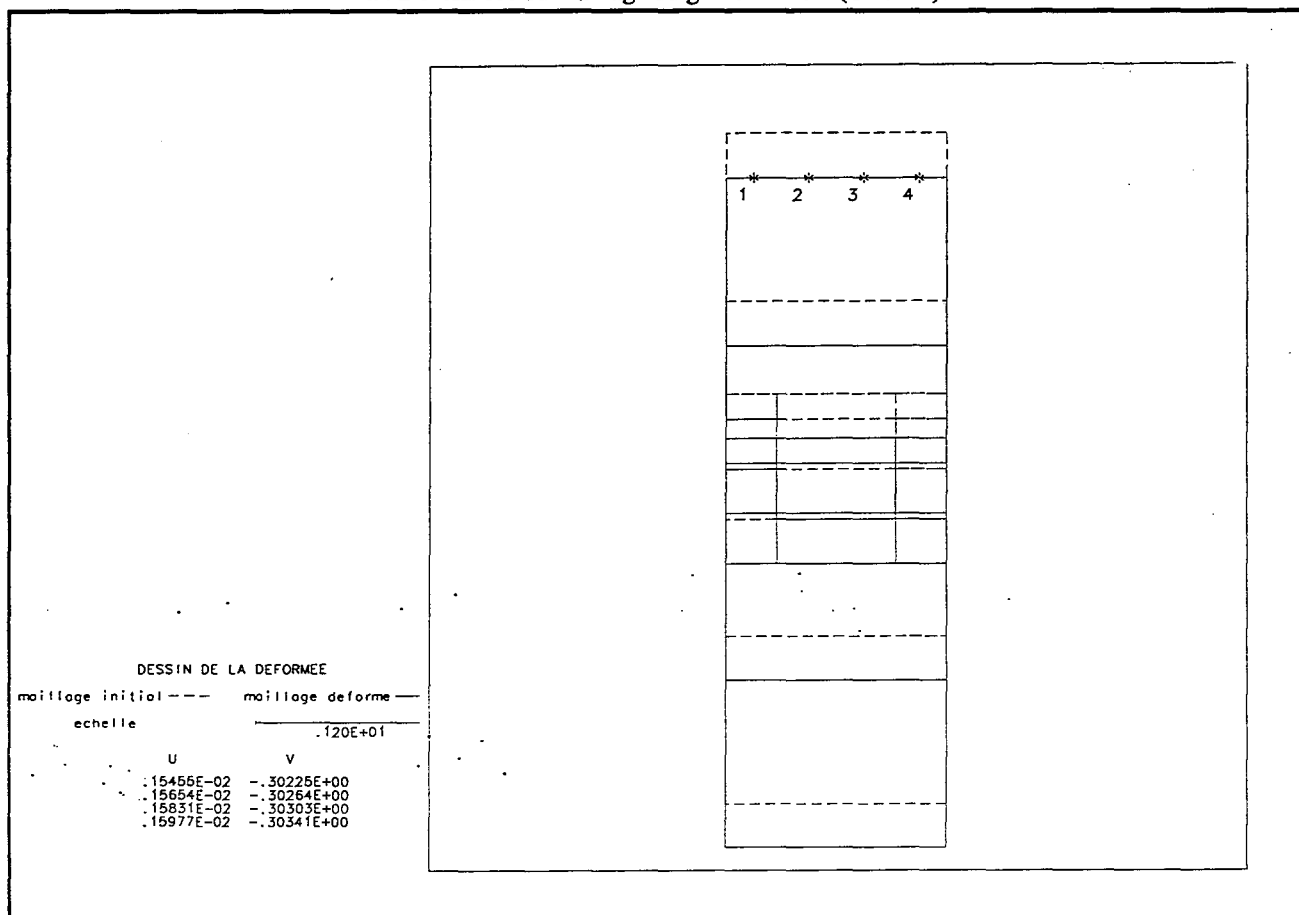
c) Conclusion

Le programme "LOUPE" est destiné à améliorer les résultats du calcul par éléments finis dans le code CESAR-LCPC, en focalisant le calcul sur une zone précise. Nous avons réussi à programmer cette technique en langage C++. Les premiers résultats présentés ci-haut sont très proches de ceux donnés par le grand modèle. Des améliorations futures pourront être utiles en ce sens afin de rendre ce code utilisable dans d'autres applications.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



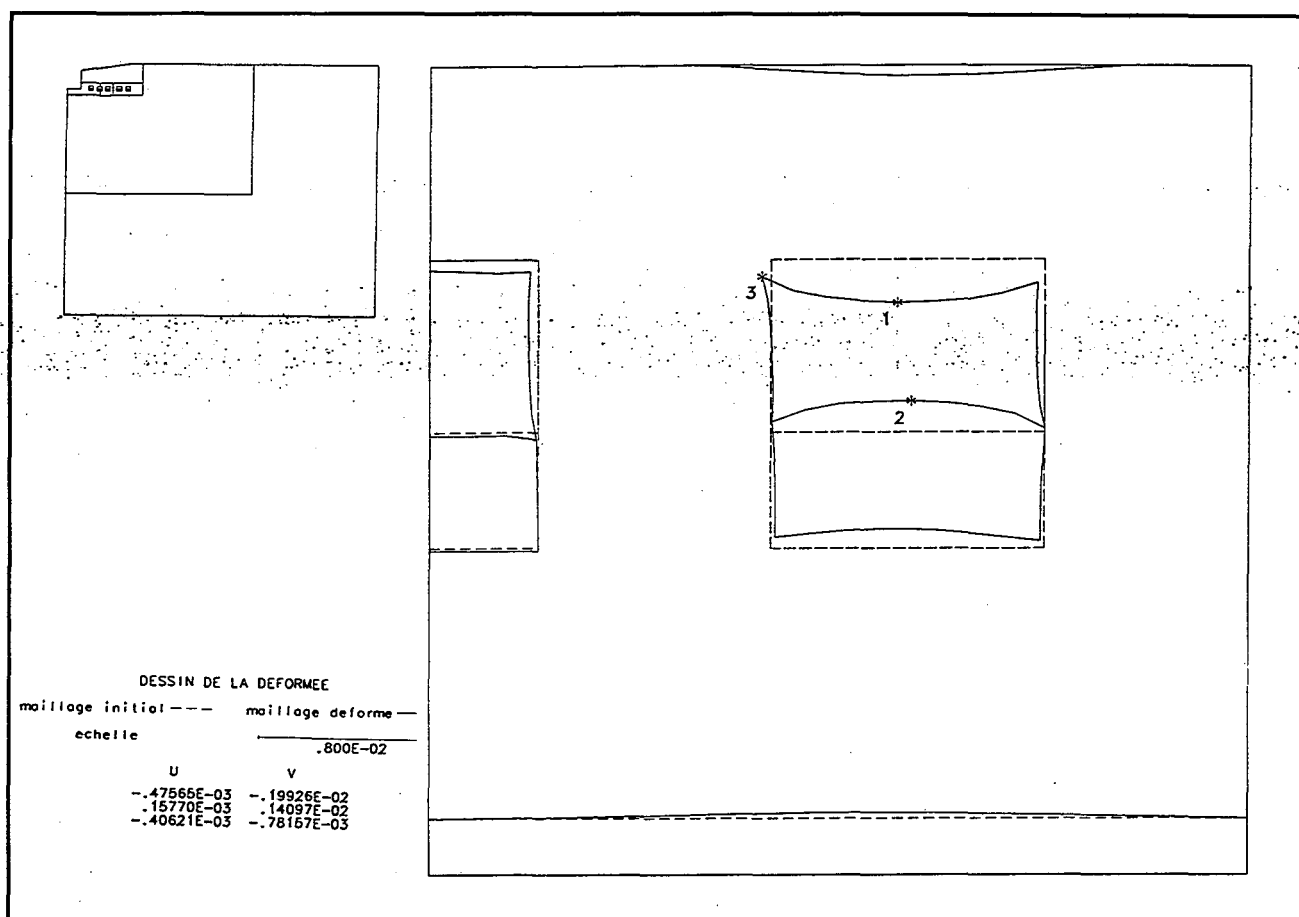
a : Déformées du maillage du grand modèle (CESAR).



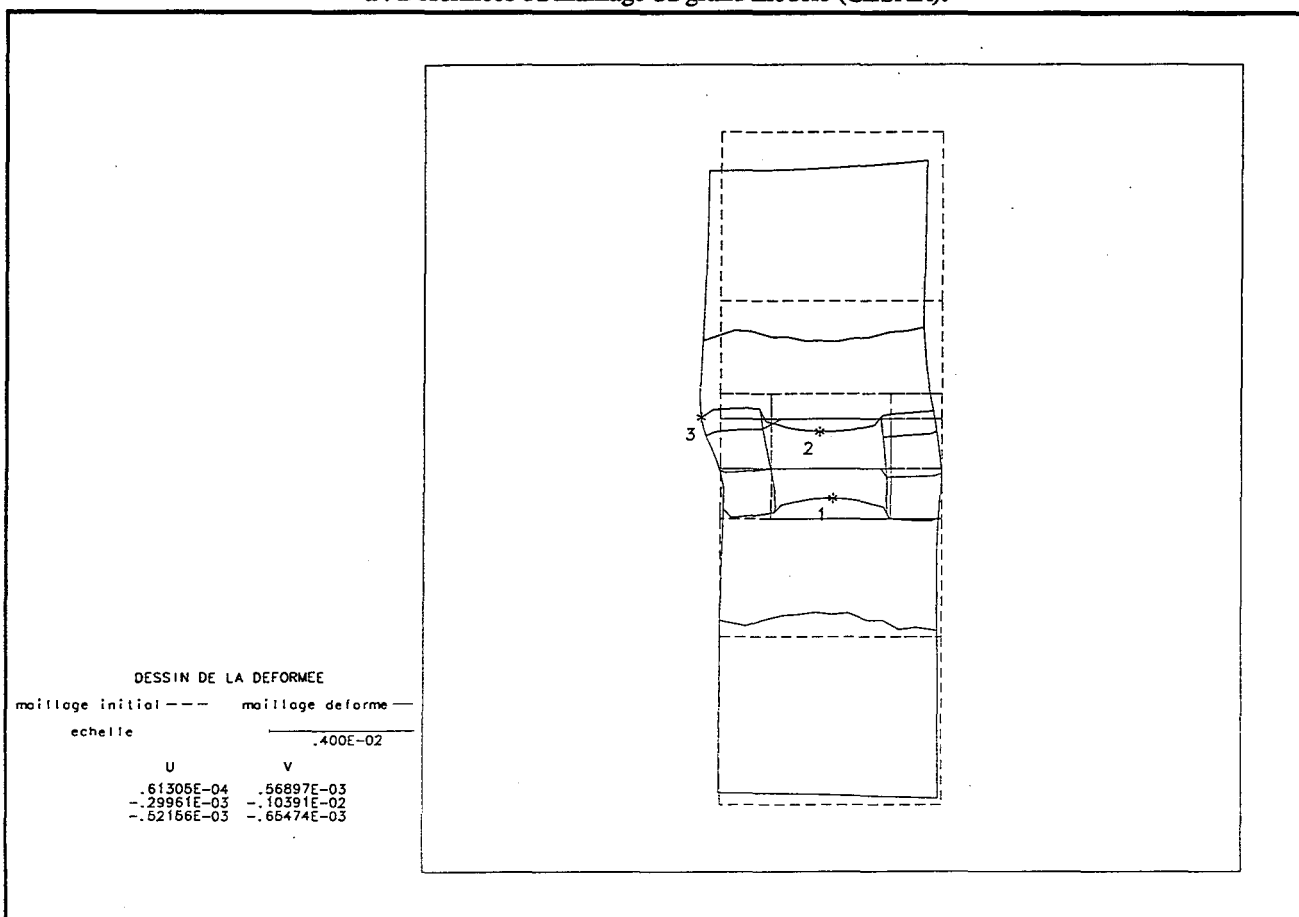
b : Déformées du maillage du petit modèle (LOUPE).

Figure III.18 : Déformées des deux modèles, état initial.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



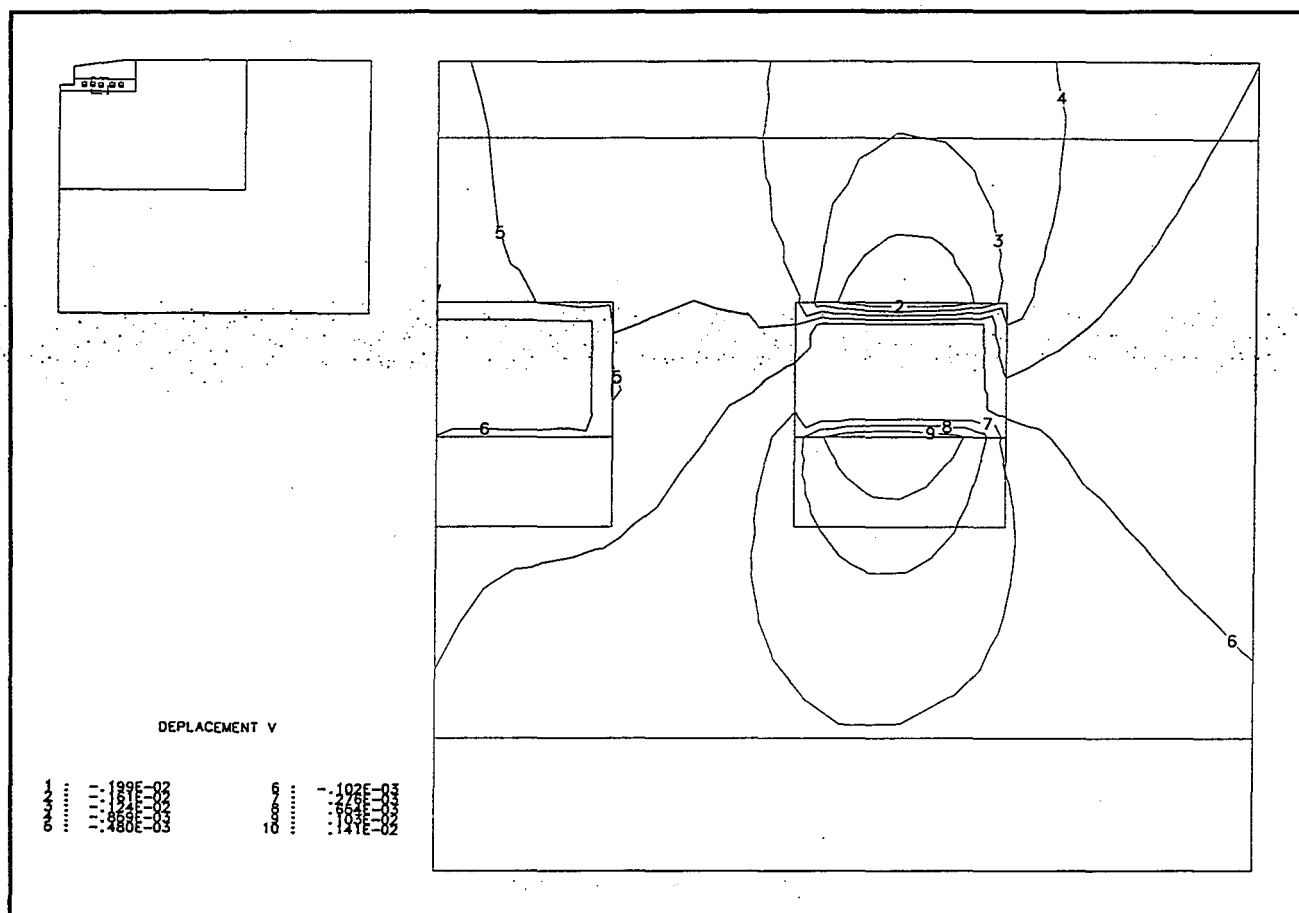
a : Déformées du maillage du grand modèle (CESAR).



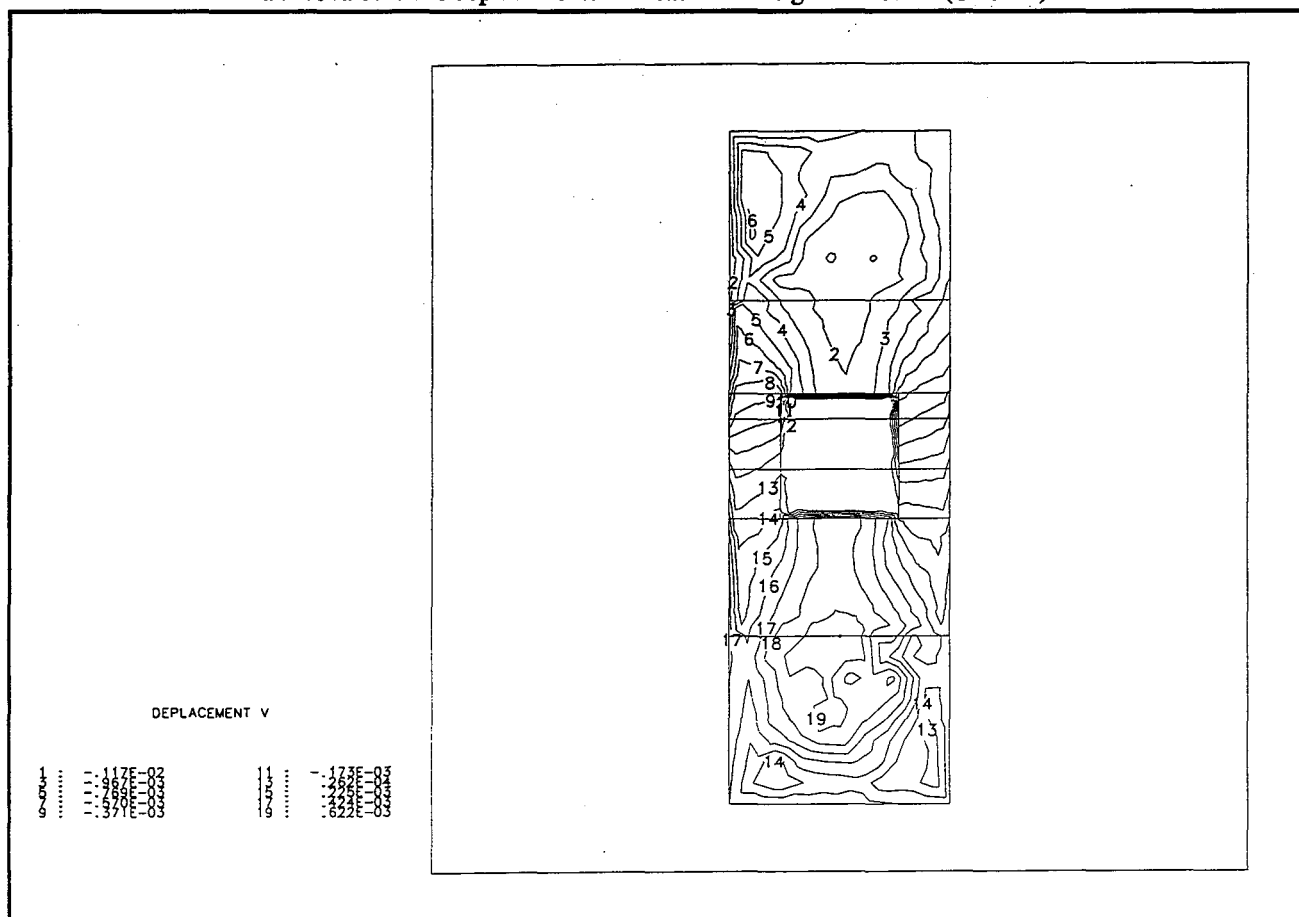
b : Déformées du maillage du petit modèle (LOUPE).

Figure III.19 : Déformées des deux modèles après excavation

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



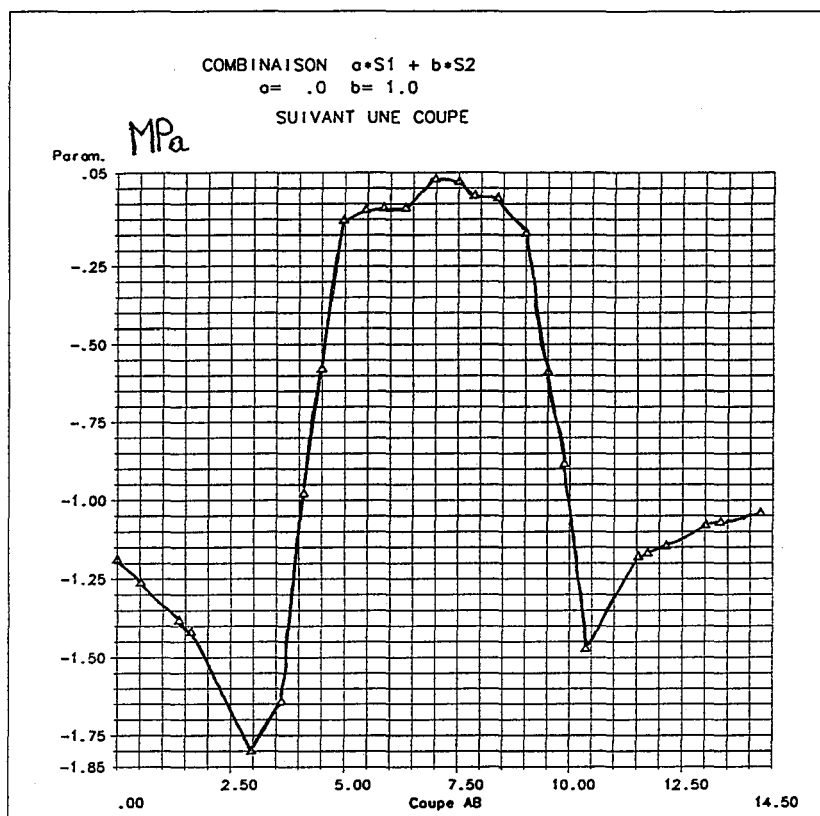
a : Isovaleurs des déplacements verticaux dans le grand modèle (CESAR).



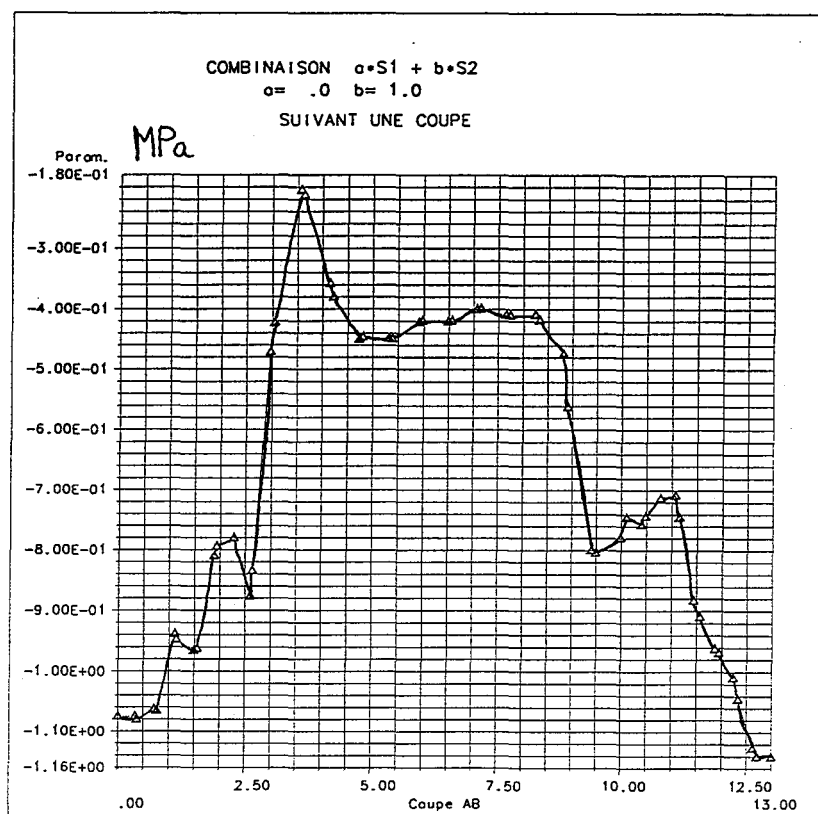
b : Isovaleurs des déplacements verticaux dans le petit modèle (LOUPE).

Figure III.20 : Isovaleurs des déplacements dans les deux modèles après excavation

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



a : Contrainte principale majeure au toit après excavation, grand modèle (CESAR).



b : Contrainte principale majeure au toit après excavation, petit modèle (LOUPE).

Figure III.21 : Contraintes majeures selon une coupe au toit dans les deux modèles

Cette démarche de calcul est très intéressante en ce qui concerne les techniques de modélisation, elle mérite d'être encouragée en poursuivant la recherche sur deux points très importants :

- rendre le programme plus performant en intégrant les lois de comportement élastoplastiques qui existent déjà dans le code CESAR-LCPC,
- introduire le menu modèle "LOUPE" dans le code CESAR-LCPC.

2.5. Discussion

Nous avons adopté une méthode directe pour la résolution du système " $F=K.U$ " (méthode de factorisation L.U). L'inconvénient de cette méthode est principalement le temps de résolution qui peut atteindre des heures en relation avec la densité du maillage. Le calcul dans CESAR-LCPC est rapide car on utilise une des méthodes itératives (Gauss-Seidel).

3. COMMENT EVALUER LES SOLLICITATIONS DANS LE CAS DES CARRIERES MULTI-NIVEAUX ?

3.1. Introduction

La présence de plusieurs niveaux d'exploitation constituent un élément de complexité dans les carrières. En effet, nous avons choisi l'une des carrières souterraines de la région parisienne et une autre carrière en Luxembourg, pour une éventuelle étude détaillée basée sur la modélisation numérique.

La première carrière a été exploitée sur trois niveaux superposés (figure III.22). Elle est globalement dans un bon état de stabilité mais on note localement une dégradation des piliers et du toit. Les caractéristiques physico-mécaniques des couches sont présentées sur le tableau III.4.

La deuxième carrière a subi des instabilités évolutives, chutes de blocs, effondrements locaux et des effondrements généralisés et notamment dans le niveau supérieur (figure III.23 & III.24). Elle est complexe par son exploitation en deux niveaux, par l'inclinaison d'environ 20° de la couche exploitée. Les caractéristiques mécaniques des couches sont indiquées sur le tableau III.5

Cette modélisation permet donc d'offrir des éléments de réponse en ce qui concerne la sollicitation de l'ensemble des ouvrages souterrains en tenant compte du phasage de calcul d'une part. Nous intéressons également à comprendre la sollicitation de la planche intercalaire avant et après effondrement.

3.2. Sollicitation des ouvrages : premier exemple

Nous avons appliqué la méthode des éléments finis pour étudier la stabilité globale. Le logiciel CESAR-LCPC qui est basé sur cette méthode, a été utilisé.

Cette étude géotechnique vise d'une manière globale la stabilité de la carrière par :

- des calculs par éléments finis en 2D selon deux coupes choisies sur le plan de la carrière passant par des piliers où on a effectué des mesures au vérin plat (figure III.25),

Nous avons choisi de faire les calculs en élasto-plasticité en admettant des critères de comportement les plus connues tels que :

- le critère parabolique qui nécessite les valeurs des résistances à la compression et à la traction,

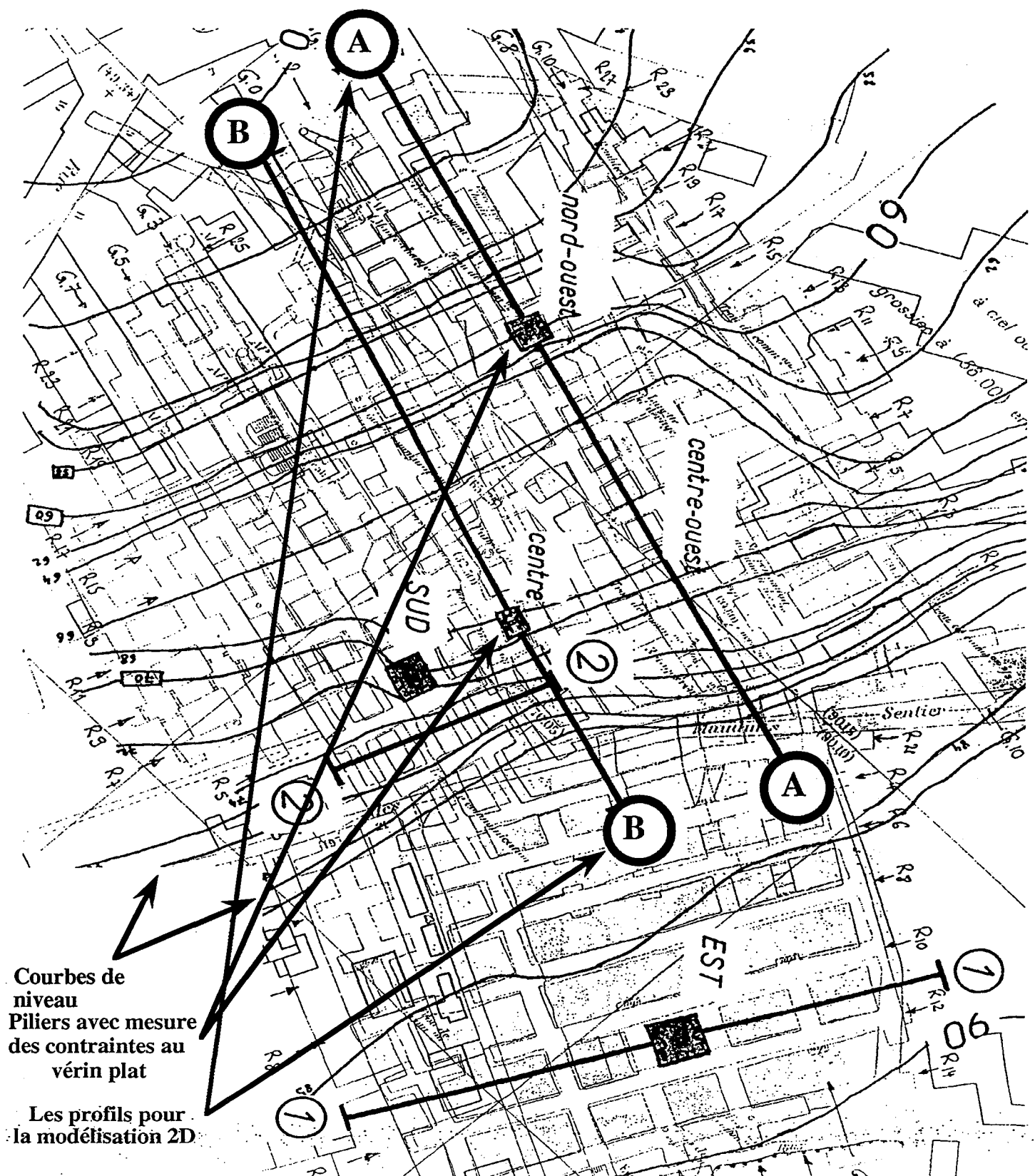


Figure III.22 : Plan de la carrière, niveaux superposés (d'après INERIS).

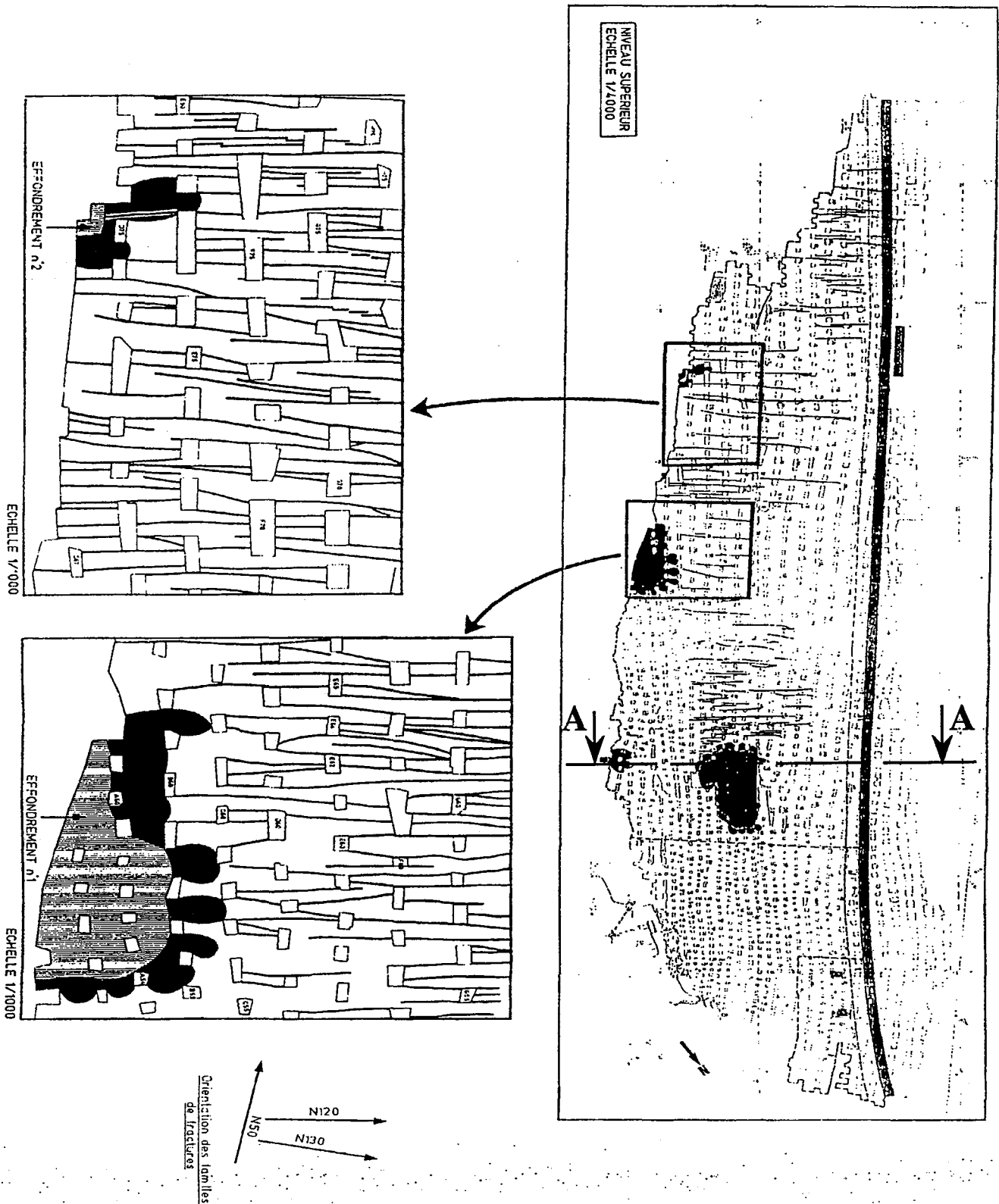


Figure III.23 : Plan de la carrière, niveau supérieur.

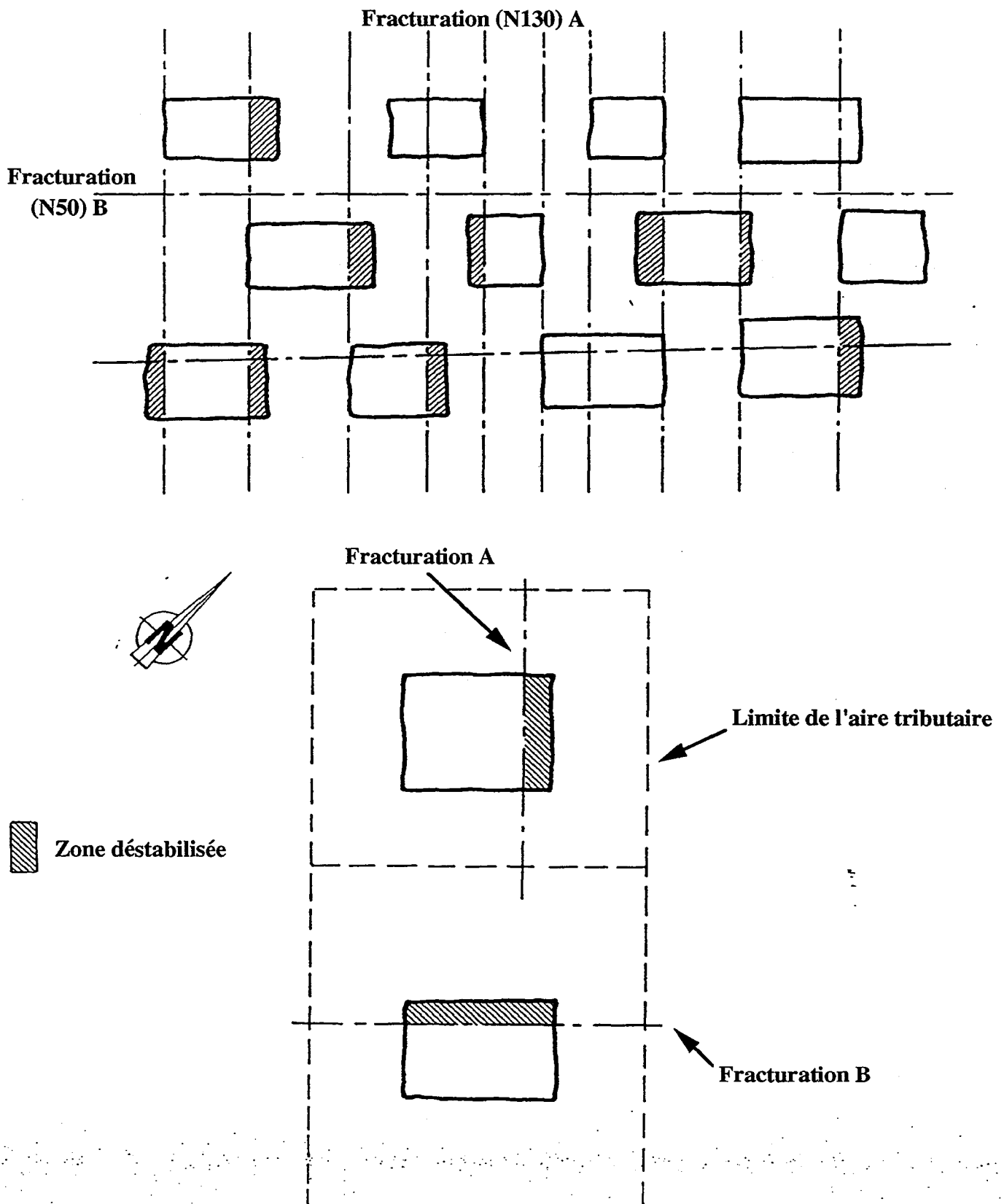


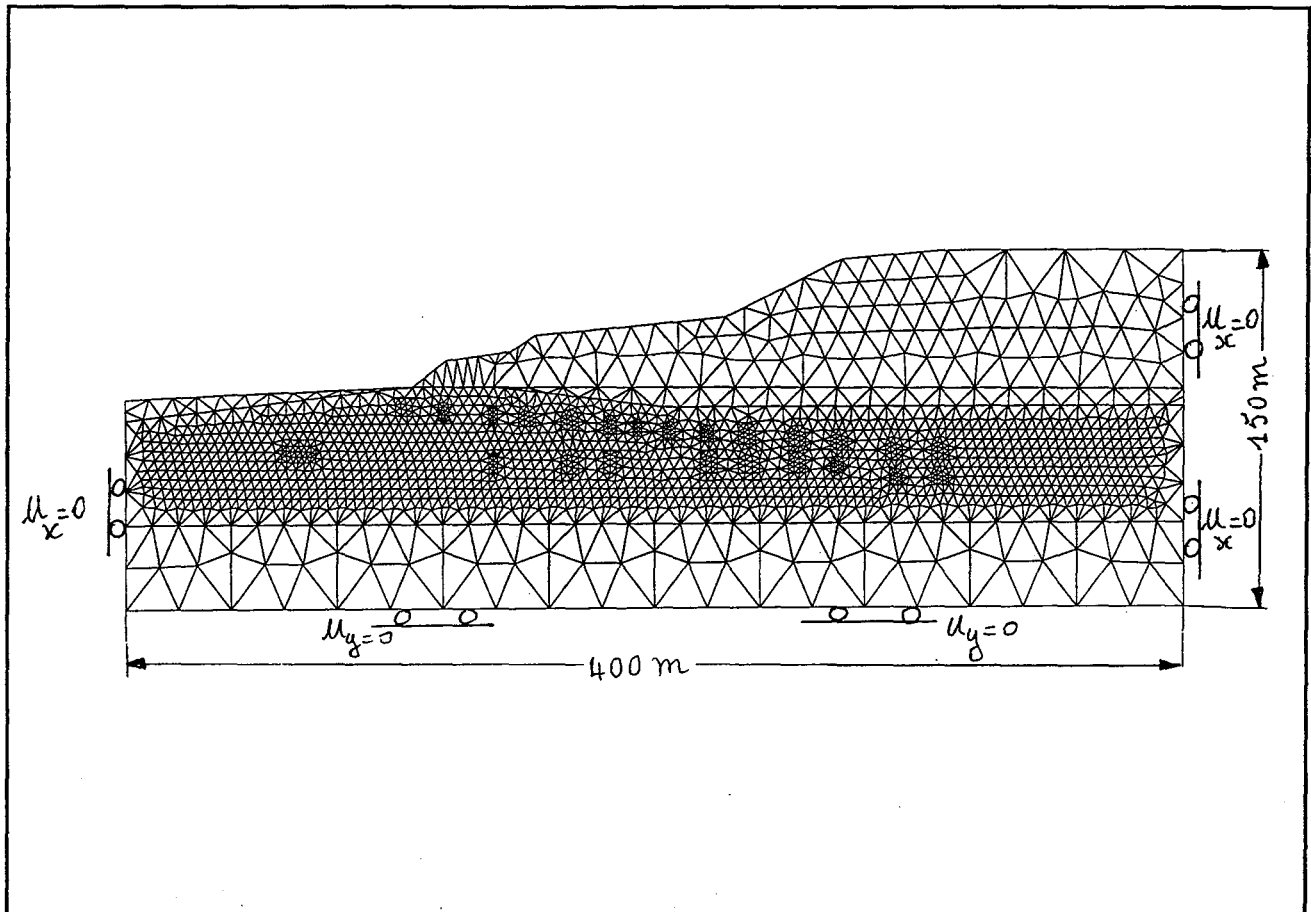
Figure III.24 : Fracturation et zones déstabilisées au niveau supérieur.

	Densité	E (MPa)	nu	Re (MPa)	Rc (MPa)	Rt (MPa)	C (MPa)	Phi (°)
Remblais	1.8						0	25
Eboulis	1.8						0	30
Calcaire	2	3000	0.3	3.5	5	0.4		
Argile	2						0.02	8
Marnes	1.8	1000	0.3		2.5			
Craie	2	1000	0.3	1.7	2.5	0.2		

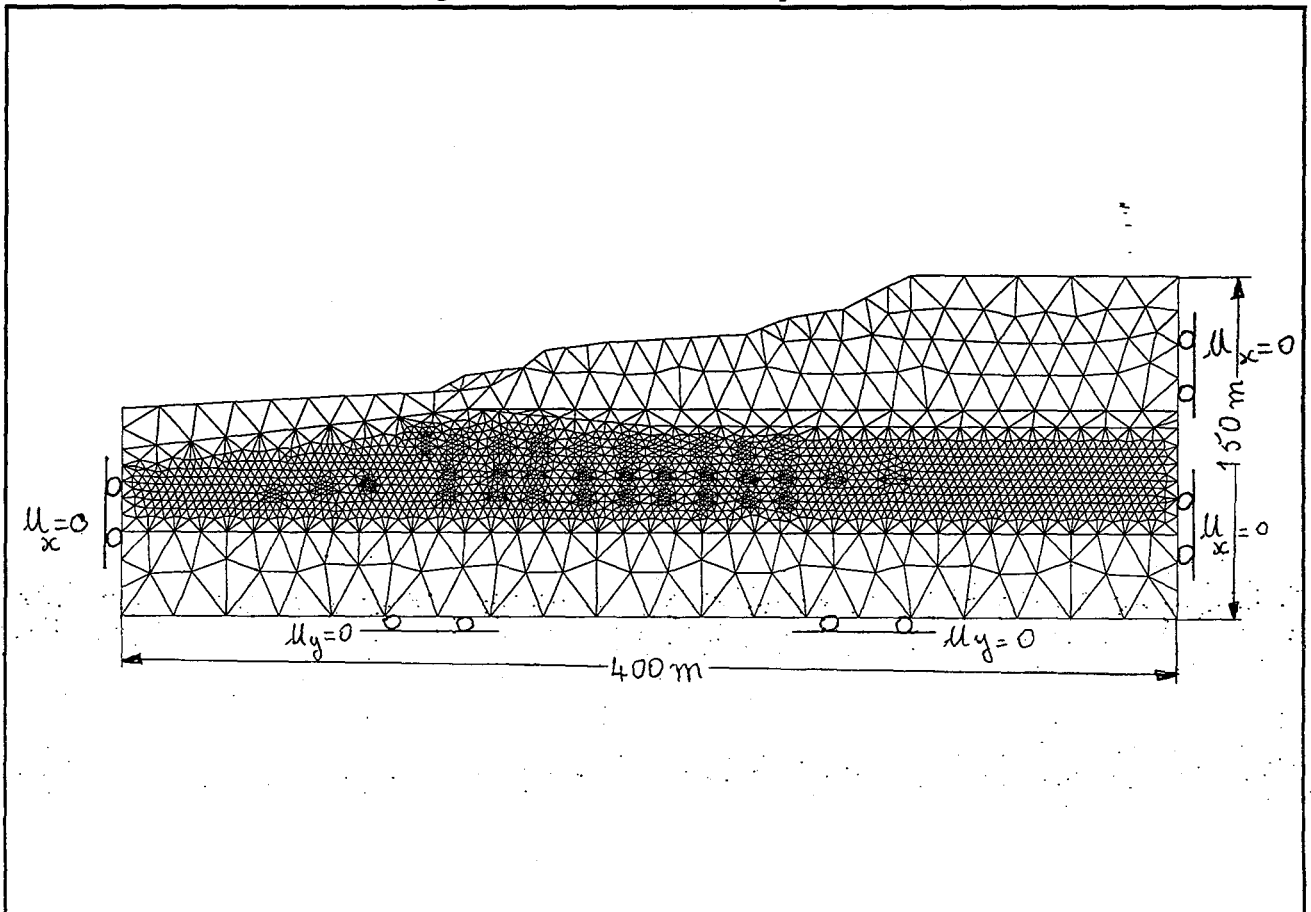
**Tableau III.4 : Caractéristiques physico-mécaniques des couches
(carrière multiniveaux sous un versant)**

	Rc (MPa)	Re (MPa)	E (MPa)	nu	Densité	Rt (MPa)
Toit	100	85	25000	0.2	2.7	6.5
Niveau Super.	162	135	35000	0.2	2.7	10
Niveau Inter.	100	80	25000	0.2	2.7	
Niveau Infer.	180	140	35000	0.2	2.7	11

**Tableau III.5 : Caractéristiques mécaniques des couches
(carrière multiniveaux avec effondrement)**



a : Maillage et conditions aux limites, coupe A-A (CESAR).



b : Maillage et conditions aux limites, coupe B-B (CESAR).

Figure III.25 : Maillage et conditions aux limites pour les deux coupes.

- le critère Mohr-Coulomb qui nécessite lui aussi les valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement interne,

Compte tenu de la complexité des carrières, nous avons effectué un calcul bidimensionnel sous l'hypothèse de déformation plane. Pour tenir compte de la troisième dimension, nous corrigeons les contraintes issues du modèle par un coefficient de surchargement suite à un calcul de type aire tribulaire.

Les modèles adoptés sont étendus en profondeur et de part et d'autre de la zone d'intérêt, afin d'éviter les effets de bord. Sur les limites latérales, nous supposons un déplacement horizontal nul et sur la limite inférieure un déplacement vertical nul (figure III.25).

Au cours de la phase de consolidation du modèle, nous admettons un chargement gravitaire par le poids propre du terrain. Lors des phases de simulation des excavations, nous admettons une pression de déconfinement simulant une phase d'excavation.

3.2.1. Choix des coupes en 2D

Le comportement mécanique de cette carrière a été modélisé en deux coupes, orientées dans l'axe des galeries N110 et N125 (dites Est-Ouest), soit parallèlement à la ligne de pente du talus.

Le choix des coupes a été guidé par la géométrie de la carrière et par d'autres aspects essentiels du problème, à savoir :

- l'analyse du comportement mécanique global de la carrière et de l'effet de versant,
- la mise en évidence de phénomènes locaux, tels que l'impact d'une mauvaise superposition de piliers par exemple et la sollicitation des planches entre niveaux,
- des mesures in situ au vérin plat ont été effectuées au sein de deux piliers, l'un parmi les piliers modélisés dans la coupe A-A, l'autre parmi ceux de la coupe B-B (figure III.22).

La première coupe, orientée Ouest-est, en secteur Nord-Ouest et Centre-Ouest, qui recoupe les courbes de niveaux perpendiculairement. Elle se caractérise par la superposition de trois niveaux exploités (c'est le maximum dans cette carrière), par la présence de zones très exploitées (55 à 60 %), dans la partie centrale, et une géométrie d'exploitation pas toujours très rigoureuse.

La deuxième coupe, elle aussi orientée Ouest-Est, située en plein milieu de la carrière. Elle se rapproche beaucoup de la première coupe, sur les points : aspects du recouvrement, géométrie, taux de défrètement, mais dans un secteur qui ne comporte que deux niveaux exploités.

3.2.2. Interprétation des résultats

Selon les deux coupes, nous avons trouvé :

- une forte dissymétrie des contraintes dans les piliers,
- apparition des contraintes de cisaillement considérables par effet de versant dans les piliers,
- idem par effet d'une mauvaise superposition des piliers d'un niveau à un autre dans les planches intercalaires.

Ces diverses influences se traduisent souvent par une déviation des contraintes principales d'un angle θ , par rapport à la verticale qui peut atteindre les valeurs suivantes :

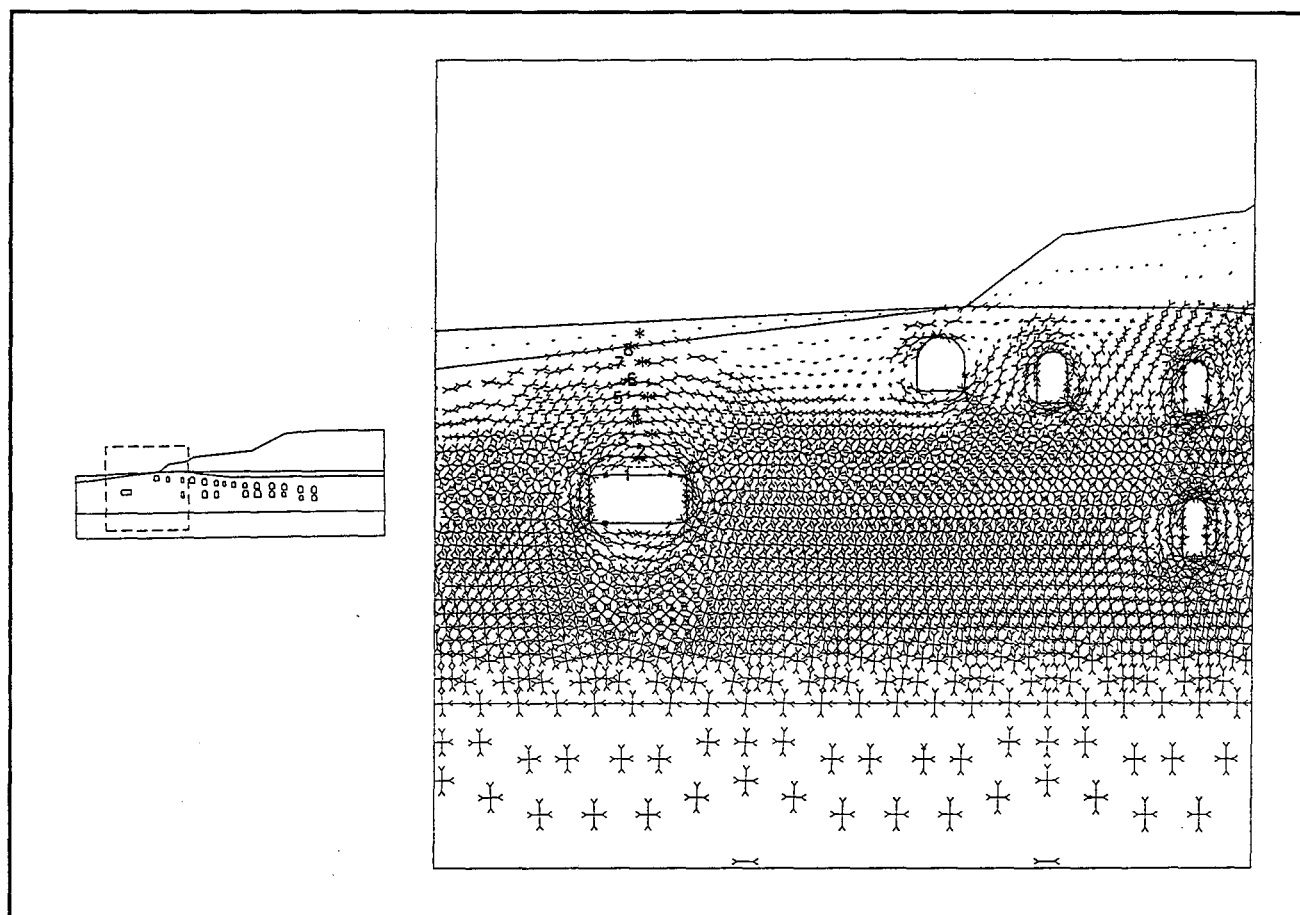
Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?

Coupe A-A				Coupe B-B			
Niv. sup.		Coeur pilier			Coeur pilier		
		min.	max.	moy.	min.	max.	moy.
	S1	0.8	1.1	1	0.9	1.4	1.3
	S3	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.15
	Sxy	0.15	0.25	0.2	-0.23	0.7	0.45
		Bords pilier			Bords pilier		
	S1	0.9	1.65	1.45	0.3	2.3	1.4
	S3	-0.15	0.1	0.04	0	-0.16	0.05
Planche 1/2		Planche			pas de niveau		
	S1	0.2	1.1	0.8			
	S3	-0.32	0.35	0.2			
	Sxy	-0.22	0.35	0.15			
Niv inter.		Coeur pilier			pas de niveau		
	S1	0.4	1.1	1			
	S3	0.1	0.4	0.3			
	Sxy	-0.15	0.25	0.15			
		Bords pilier					
	S1	0.5	2.1	1.45			
	S3	-0.15	0.05	0.08			
Planche 2/3		Planche			Planche 1/3		
	S1	0.4	1.7	0.9	0.3	1.5	1
	S3	-0.3	0.5	0.25	-0.4	0.42	0.35
	Sxy	-0.2	0.6	0.35	-0.25	0.52	0.4
Niv. inf.		Coeur pilier			Coeur pilier		
	S1	0.5	1.15	1.1	0.4	1.3	1.3
	S3	0.1	0.5	0.4	0.2	0.3	0.2
	Sxy	-0.1	0.3	0.25	-0.1	0.45	0.1
		Bords pilier			Bords pilier		
	S1	0.9	1.7	1.45	0.8	2.1	1.4
	S3	-0.2	0.1	0.15	0	-0.2	-0.1

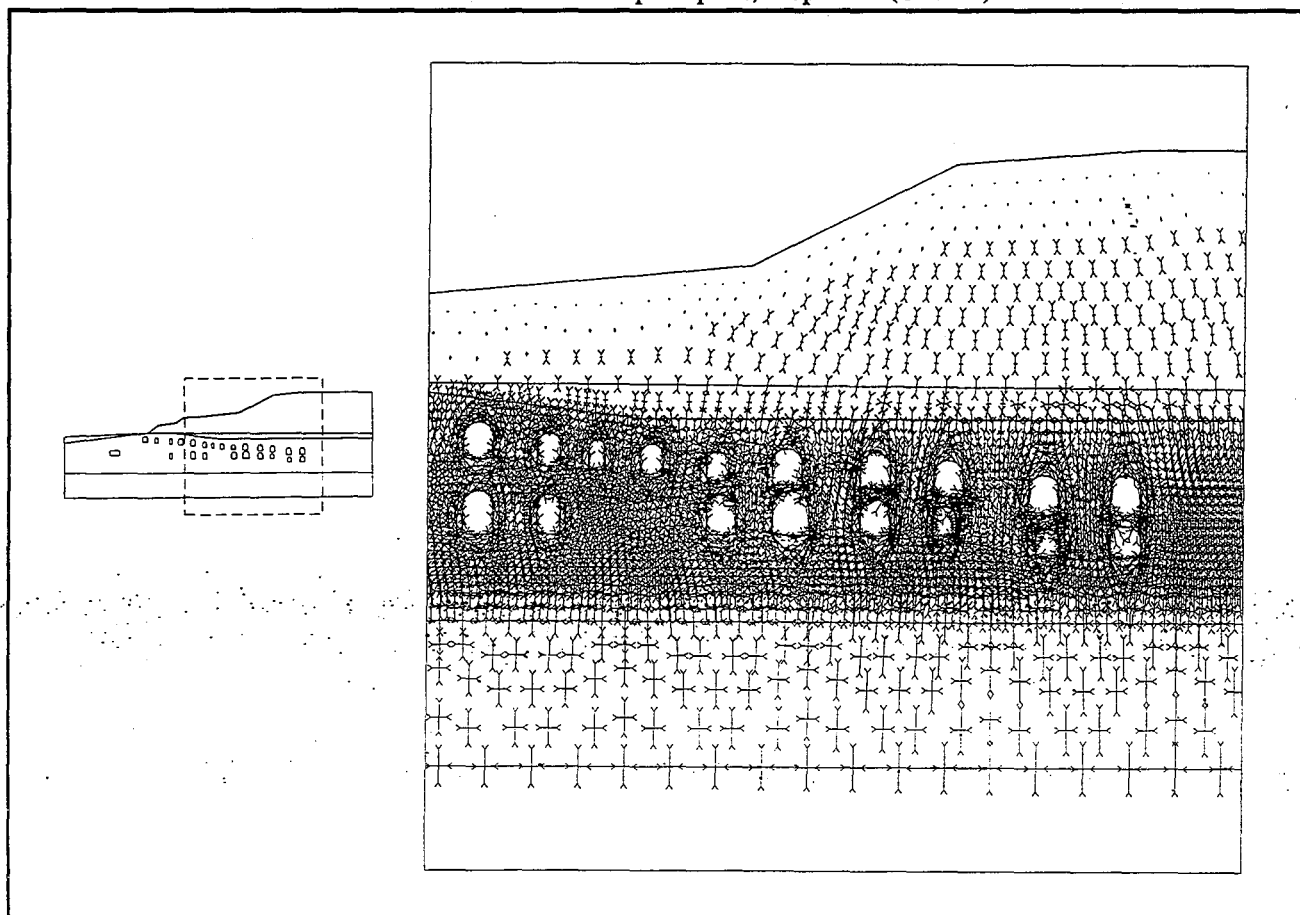
Tableau III.6 : Contraintes aux différents endroits des ouvrages.

Valeurs négatives : contraintes en traction

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



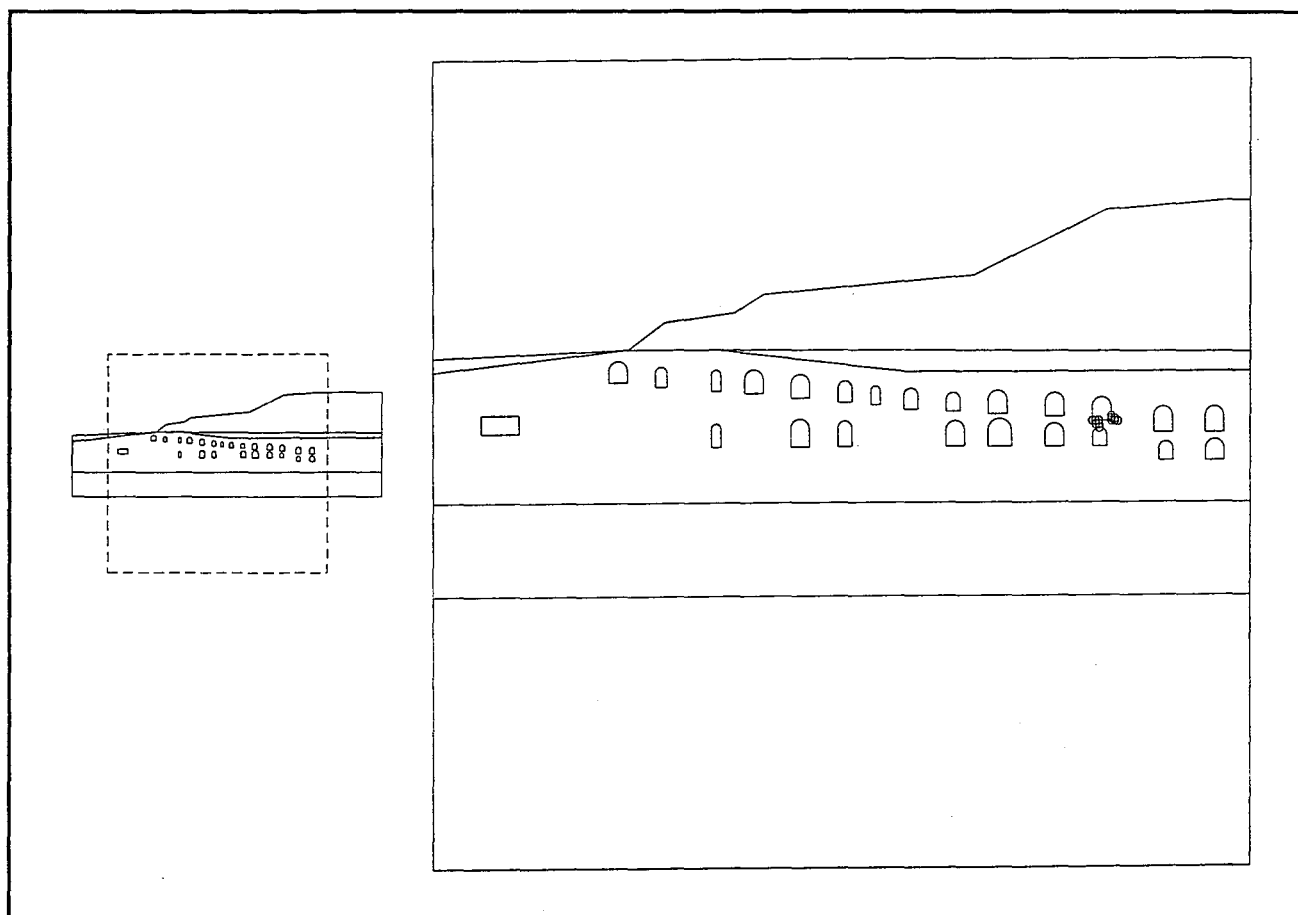
a : Zoom 1 sur les contraintes principales, coupe A-A (CESAR).



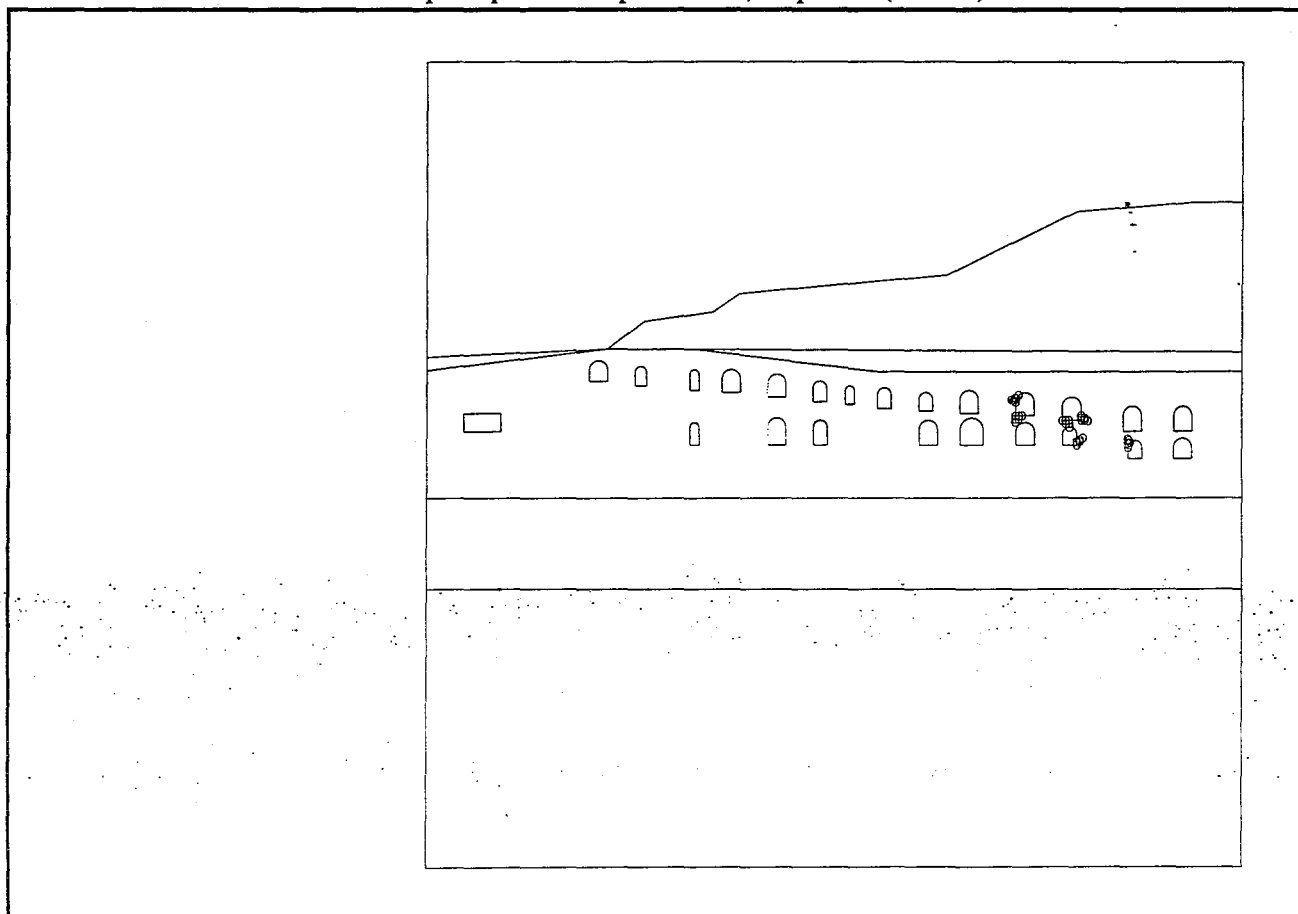
b : Zoom 2 sur les contraintes principales, coupe A-A (CESAR).

Figure III.26 : Traces des contraintes principales en phase finale.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



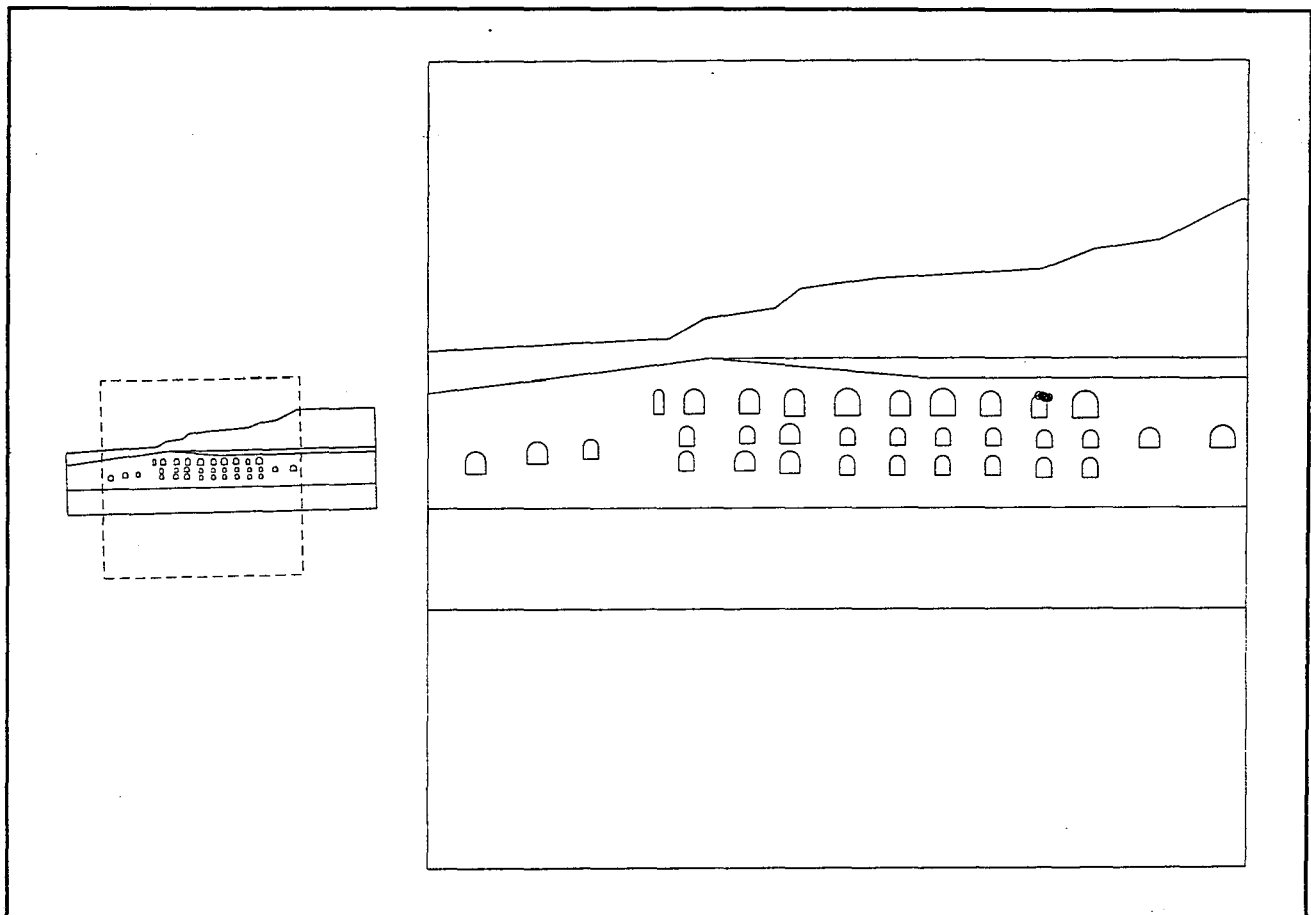
a : Points plastiques avant la phase finale, coupe A-A (CESAR).



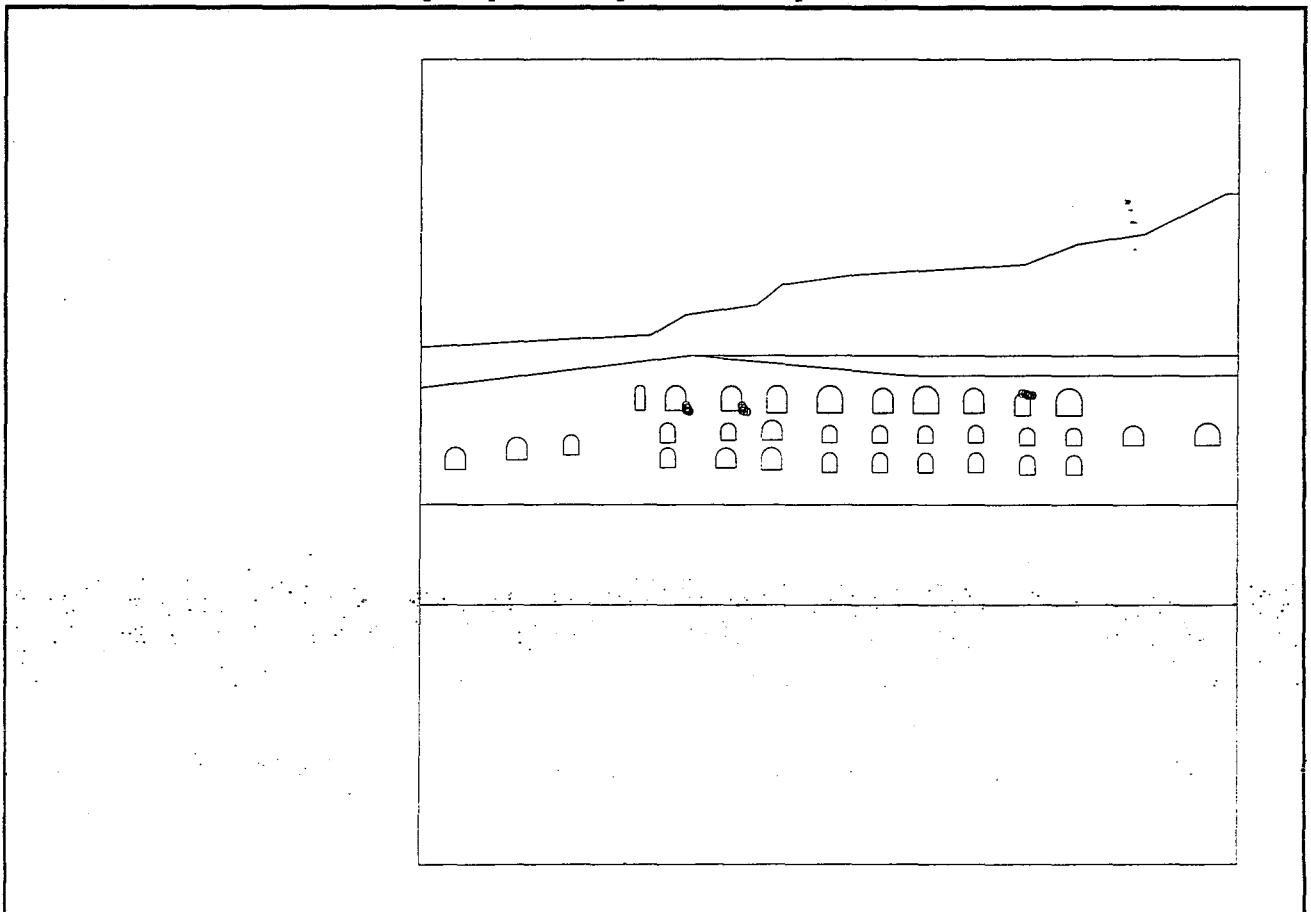
b : Points plastiques en phase finale, coupe A-A (CESAR).

Figure III.27 : Traces des points plastiques.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



a : Points plastique avant la phase finale, coupe B-B (CESAR).



b : Points plastiques en phase finale, coupe B-B (CESAR).

Figure III.28 : Traces des points plastiques.

- 10° à 15° dans les piliers,
- 5° à 10° dans l'axe de la voûte de détente au-dessus des galeries,
- 10° à 25° sous l'effet du recouvrement,
- 15° à 18° par une mauvaise superposition des galeries.

Sur les parements des piliers, nous relevons d'un niveau à l'autre des valeurs de contrainte majeure maximale S1 de l'ordre de 1.7 à 2.1 MPa, avec une contrainte mineure de traction dans le plan horizontal, S3, dépassant localement et superficiellement 0.2 à 0.3 MPa (tableau III.6). La figure III.26 illustre les traces des contraintes principales. A très faible profondeur et avec une grande portée des chambres, les contraintes en traction se propagent à partir du toit jusqu'à la surface. Cette situation pourrait provoquer des instabilités (fontis par exemple).

Les contraintes de cisaillement dans les planches intercalaires sont assez élevées (plans verticaux et horizontaux) sans, toutefois, dépasser 0.4 MPa (milieu de la planche).

Dans les piliers, nous notons, toutefois, un cisaillement assez faible mais généralisé dans les piliers, qui augmente avec la hauteur de recouvrement.

Sur l'ensemble de deux coupes, les zones les plus sensibles correspondent à la partie la plus défruitée. Des relevés ponctuels font apparaître des points en plasticité au niveau du mur des galeries mais aussi et surtout de la voûte ainsi que dans les planches intercalaires où les contraintes de cisaillement peuvent dépasser 0.4 à 0.5 MPa.

Les points plastiques dans les deux modèles en phases finales se localisent dans les endroits où la superposition est mauvaise, un taux de défruitement élevé et une faible puissance de la planche entre niveau (figure III.27 & III.28).

3.2.3. Conclusion

L'analyse du comportement mécanique de cette carrière par la méthode des éléments finis a permis de mettre en évidence un certain nombre de configurations défavorables dont les effets se traduisent par :

- des phénomènes affectant globalement certains secteurs ou parties importantes de la carrière,
- des mécanismes particuliers, à l'échelle du pilier que l'on peut qualifier de phénomènes locaux.

Du fait du recouvrement différentiel et de la faible profondeur de la carrière, l'influence du versant se ressent assez profondément. Elle s'étend au-delà du niveau inférieur et se traduit de plusieurs façons :

- un cisaillement non négligeable sur les plans verticaux et horizontaux dans les piliers. Son importance est d'autant plus grande que le recouvrement est épais,
- des sollicitations plastiques de plus en plus importantes vers l'Est, sous recouvrement plus important.

Ces phénomènes peuvent être localement accentués par une mauvaise superposition des piliers, ou un amincissement des planches.

La détente autour des galeries superposées avec une trop faible épaisseur de planche cisailée, engendre des tractions dans la planche dès les premières flexures topographiques. Ces tractions peuvent apparaître sur toute l'épaisseur des planches et s'accroissent avec l'enfouissement.

Dans le cas d'une mauvaise superposition de piliers, il se produit un déséquilibre des contraintes verticales dans les piliers. Au niveau supérieur, les parements Nord subissent l'effet de la détente des chambres sous-jacentes. Le report des contraintes se fait donc essentiellement sur les parements Sud. Au niveau inférieur, la situation est inversée. La planche, quant à elle, subit le contrecoup des détente des deux niveaux. Il en résulte une réduction de la section efficace des piliers verticaux. Cela contribue au développement d'un cisaillement important de la planche qui peut atteindre 0.5 à 0.6 MPa, et ce sur toute la zone affectée par le décalage. Ce cisaillement est maximal dans les parties les moins épaisses de la planche.

Il arrive parfois que des petits piliers supportent un grand pilier sus-jacent, cette configuration particulière des piliers, induit deux phénomènes particuliers :

- une surcharge des petits piliers sous-jacents qui se traduit par une forte contrainte verticale. Des zones en surcontrainte apparaissent en bordure de piliers et s'étendent assez en profondeur dans les piliers.

C'est aussi à cet endroit que les piliers sont déconfinés, voire même soumis à de faibles tractions. Cette situation est propice au développement d'une fracturation superficielle (écaillage),

- une figure de poinçonnement du grand pilier, à son extrémité Sud, par le petit pilier sous-jacent, s'observe également sur ce modèle. Il s'ensuit un fort cisaillement de la planche qui se répercute en s'amortissant tout le long de la planche et même dans le grand pilier. La situation revient à la normale dès que la superposition des piliers redevient cohérente.

Tous ces mécanismes, induits par une géométrie d'exploitation complexe, engendrent sur les ouvrages des comportements locaux complexes, eux aussi.

Si certains phénomènes de détente sont parfois observés sur les galeries sous-jacentes, dans la plupart des cas ces mécanismes se traduisent par une modification de l'état des contraintes et une augmentation des tractions et cisaillement, en particulier dans les planches intercalaires.

3.3. Sollicitation des ouvrages : deuxième exemple

3.3.1. *Le modèle choisi*

Pour un calcul bidimensionnel, nous avons choisi un modèle qui passe par l'effondrement central du niveau supérieur de la carrière pour reconstituer l'état des piliers avant effondrement ce qui permet de comprendre les causes principales de l'effondrement.

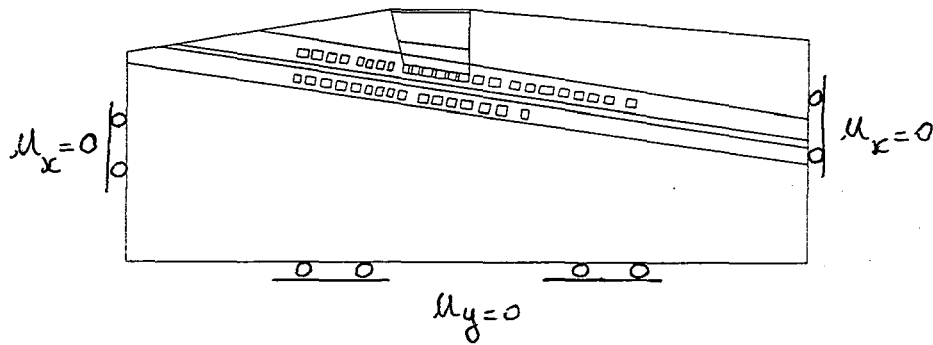
La coupe verticale est schématisée sur la figure III.29 ainsi que les conditions aux limites et le maillage adopté.

Le calcul par phase permet lui aussi d'évaluer le degré de sollicitation des ouvrages avant et après effondrement et permet aussi de prévoir les zones les plus proches de l'état critique (proche de la rupture) dans les piliers, au toit des galeries et dans la planche intercalaire.

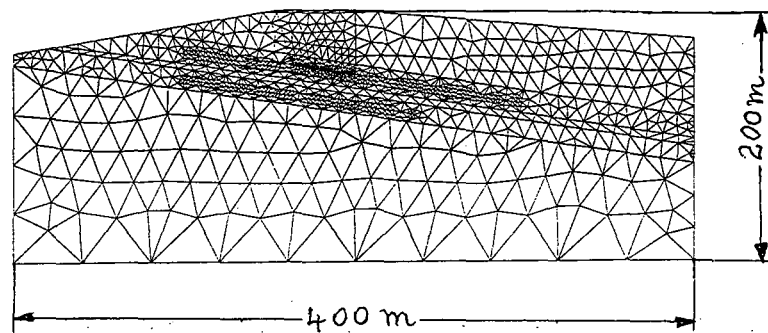
Nous avons gardé les mêmes conditions aux limites appliquées dans les modèles pour les carrières à flanc de falaise ainsi que le chargement du modèle. Les limites latérales sont supposés fixes (déplacements horizontaux nuls). A la base du modèle les déplacements verticaux sont aussi nuls (figure III.29).

Le modèle est chargé uniquement par le poids du terrain pendant la phase de consolidation. La simulation des excavations fait appel à une pression de déconfinement simulant une phase d'excavation.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?

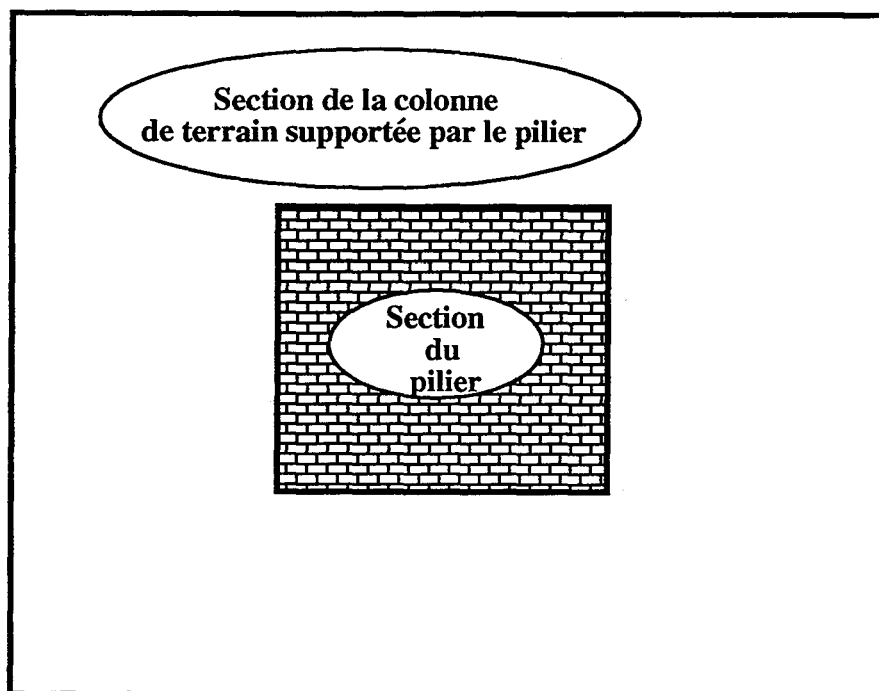


a : Conditions aux limites du modèle.

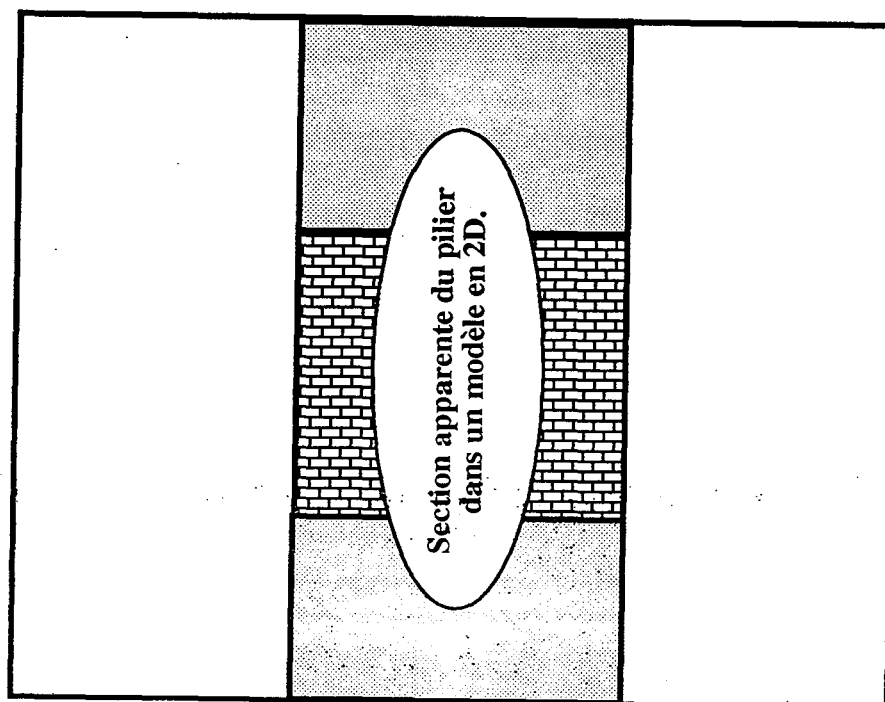


b : Maillage adopté.

Figure III.29 : Conditions aux limites et maillage.



a : Vue en plan d'un pilier réel.



b : Vue en plan d'un pilier modélisé en 2D.

Figure III.30 : Correction des contraintes par l'aire tributaire.

3.3.2. Comment tenir compte des dimensions des piliers ?

Pour tenir compte de la troisième dimension, une correction par l'aire tributaire est introduite. Le calcul bidimensionnel, selon une coupe verticale, sous l'hypothèse des déformations planes, dans une exploitation par chambres et piliers, sous-estime les résultats, puisque les piliers et chambres ont une longueur infinie dans la troisième direction et agissent donc, vis à vis de la stabilité, comme des bandes pleines ou vides.

La figure III.30 présente la méthode qui permet de corriger les résultats du calcul numérique en terme des contraintes.

La force agissante sur chaque pilier est égale à :

$$\sigma_0 \cdot S_0$$

où :

σ_0 contrainte initiale verticale en vierge (avant exploitation) qui est égale à :

$$\rho \cdot g \cdot H_r$$

où :

ρ masse volumique, g accélération de la pesanteur et H_r la hauteur de recouvrement.

S_0 surface tributaire d'un pilier (surface du pilier + 1/2 surface des galeries qui l'entourent).

La contrainte moyenne correspondant à l'aire tributaire est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_{at} = \frac{\sigma_0 \cdot S_0}{S_p}$$

où :

S_p la section réelle du pilier.

La contrainte moyenne calculée en déformation plane est égale à :

$$\sigma_{cal} = \frac{\sigma_0 \cdot S_0}{S_f}$$

où :

S_f la section apparente du pilier par mètre d'épaisseur du modèle (de longueur infinie).

Le rapport des deux contraintes est appelé le coefficient de correction K :

$$K = \frac{\sigma_{at}}{\sigma_{cal}} = \frac{S_f}{S_p}$$

Le long de la coupe modélisée, nous avons 24 piliers au niveau supérieur et 16 piliers au niveau inférieur. Pour chaque piliers, nous calculons un coefficient K. Les contraintes corrigées seront par la suite comparées à des contraintes calculées par le modèle.

3.3.3. Résultats et interprétations

a) Sollicitation des piliers

Nous avons effectué une correction sur les valeurs moyennes des contraintes principales majeures issues du modèle bidimensionnel.

Les contraintes au sein des piliers du niveau supérieur atteignent une valeur maximale 20 MPa et en particulier dans les piliers situés au niveau de l'effondrement central (figure III.31).

Les contraintes dans les piliers du niveau inférieur varient de 8 MPa à 19 MPa. On note au passage la forte sollicitation des piliers se situant juste au dessous de l'effondrement. Un taux de défruitement légèrement élevé à cet endroit peut être le responsable des manifestations des chutes des blocs et la fracturation des piliers (figure III.32).

Pour mieux comprendre la situation globale en tenant compte de la sollicitation en tout point des piliers, le calcul par éléments finis qui est plutôt quantitatif donne des éléments de réponse en ce qui concerne l'indication du degré du cisaillement des piliers et la planche intercalaire.

Sous l'effet de l'inclinaison de la couche exploitée, les piliers présentent un taux de cisaillement maximal en comparaison avec une couche horizontale. On observe une déviation de la contrainte principale majeure avec la verticale (figure III.33 & III.34).

b) Sollicitation de la planche

Selon le modèle par éléments finis, les distributions de contraintes annoncent un important cisaillement au sein de la planche et en particulier en haut et en bas au voisinage des niveaux. Alors qu'au toit et au mur de toutes les chambres, on observe sur le modèle une détente des contraintes créant des contraintes de traction non négligeables.

Une mauvaise superposition des piliers d'un niveau à un autre est une raison qui peut aggraver la situation et en particulier au toit du niveau inférieur.

c) Interprétation des points plastiques

Comme dans les cas précédents, les points plastiques indiquent les endroits dans les ouvrages les plus sollicités ou les plus proches de la rupture.

Sur la figure III.33, nous avons regroupé les différentes phases de creusement en montrant les traces des points plastiques autour des piliers. En phase finale, nous constatons que la totalité des piliers de deux niveaux subissent une forte sollicitation proche de la rupture.

Les zones plus défruitées et en particulier les piliers qui se trouvent au niveau de l'effondrement central ne résistent plus au chargement du terrain de recouvrement et c'est la raison pour laquelle ils ont été écrasés (figure III.34).

On note aussi la forte sollicitation des piliers du niveau inférieur juste en dessous de l'effondrement ainsi que les piliers au voisinage.

L'observation sur place de la carrière justifie ce calcul par éléments finis, en effet plusieurs piliers de deux niveaux présentent des désordres, des fractures importantes dues aux fortes contraintes, des décollements de blocs dans la partie centrale et des piliers en forme de sablier (BLANC P., 1992 [3]).

Figure III.31 : Histogramme des contraintes calculées et corrigées (CESAR)

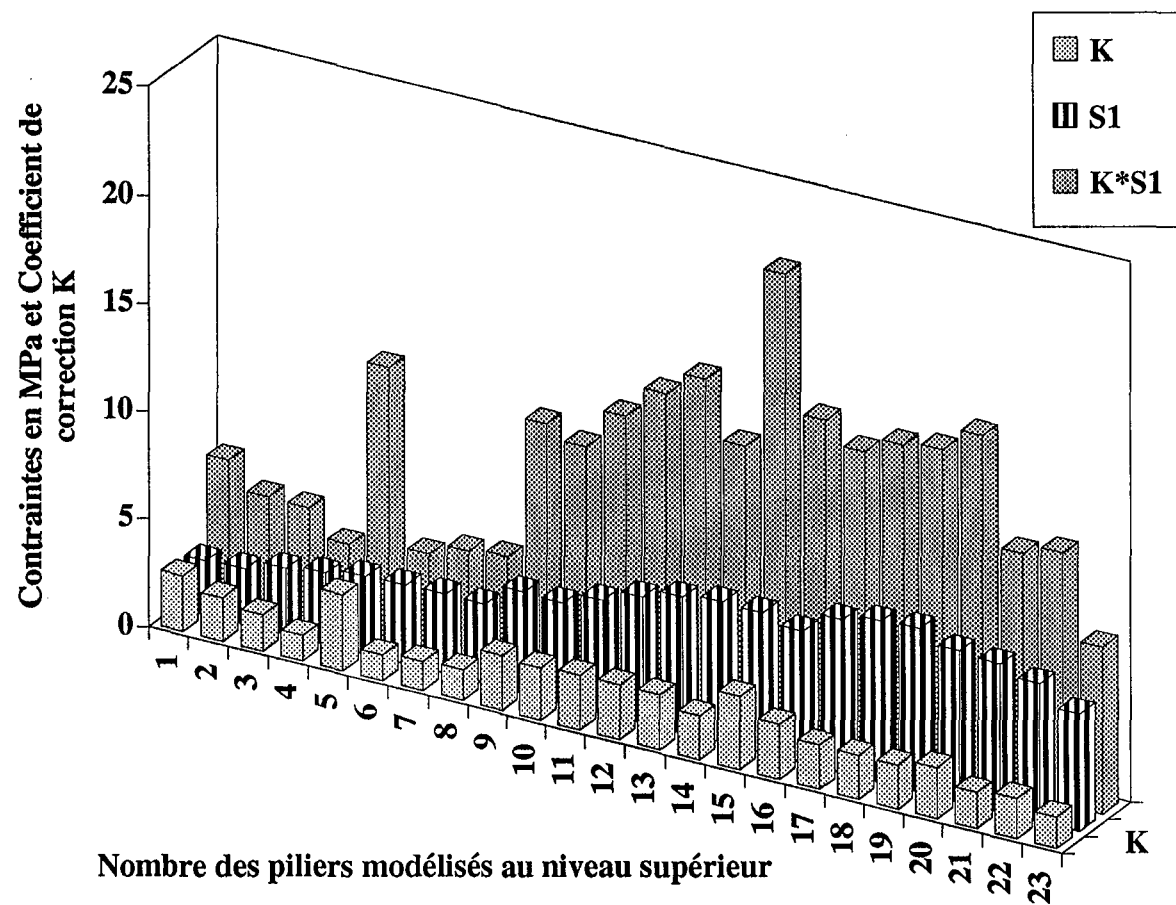
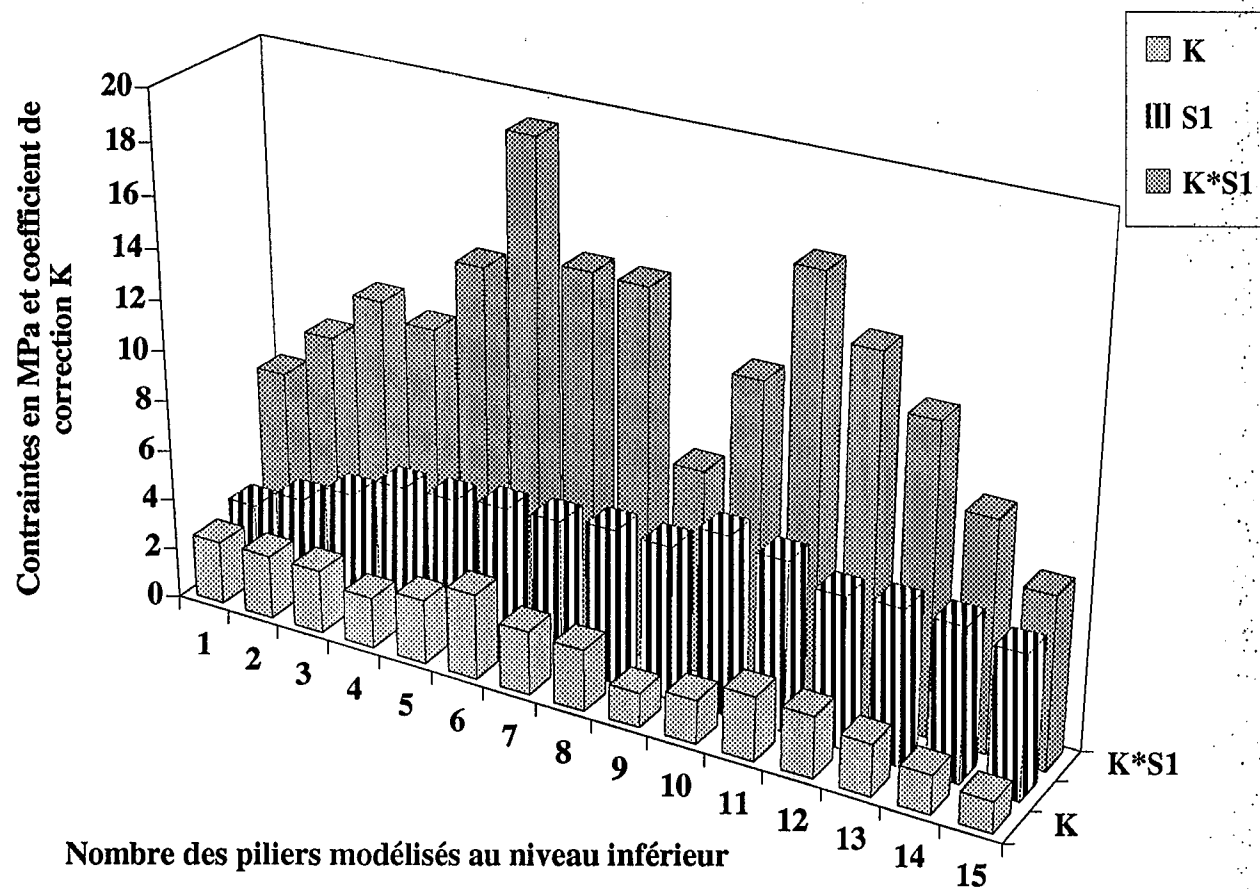
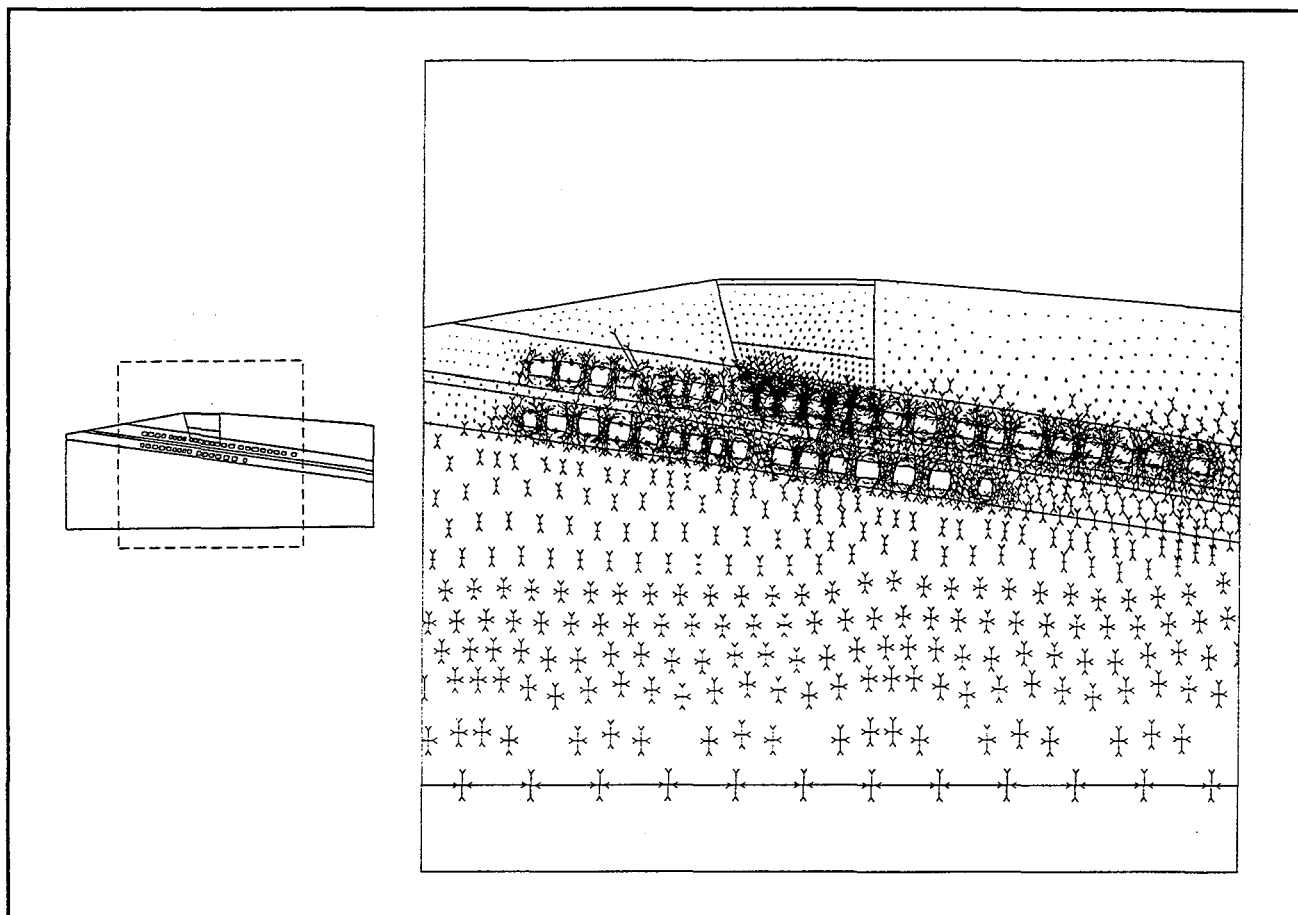


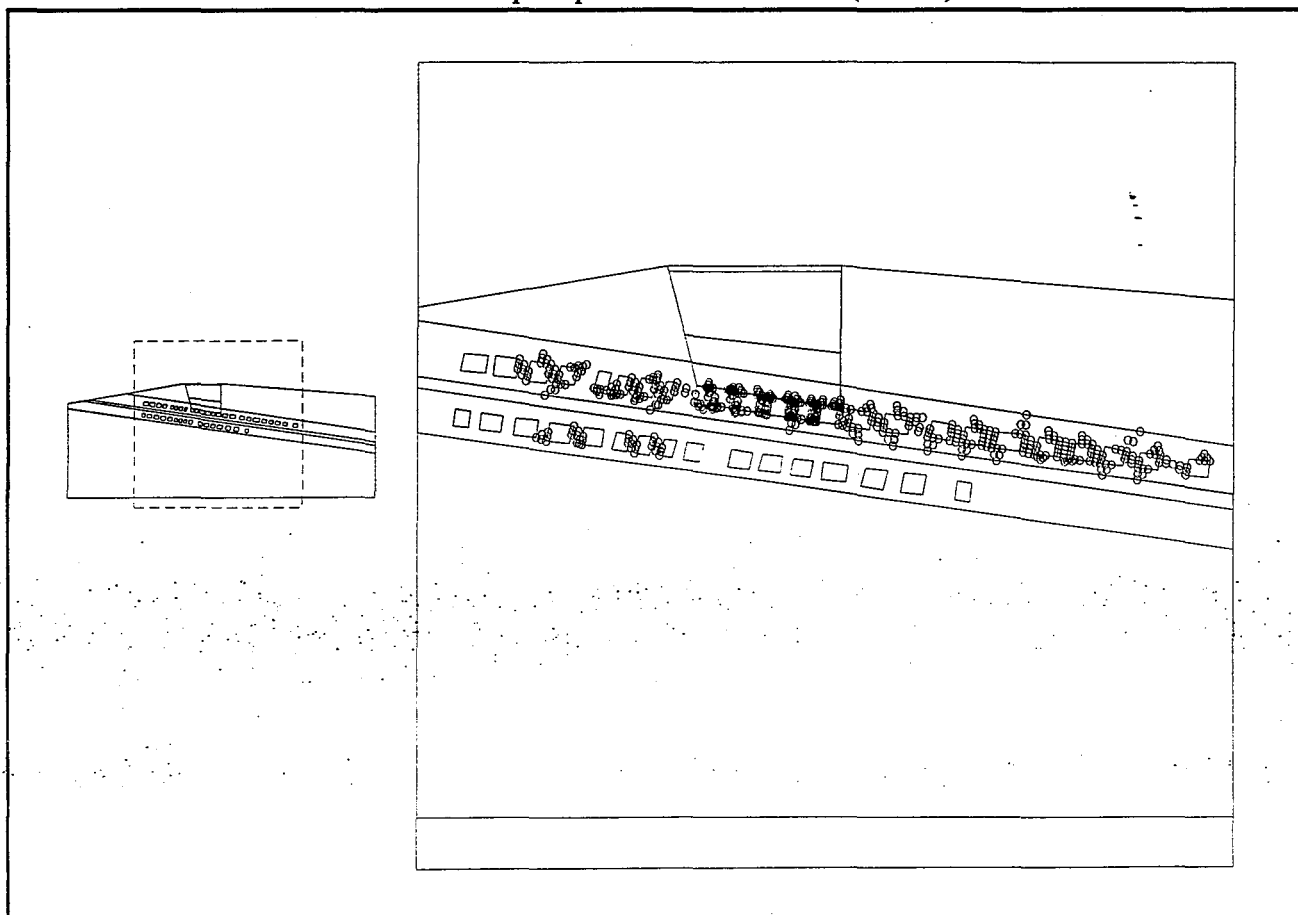
Figure III.32 : Histogramme des contraintes calculées et corrigées (CESAR)



Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?

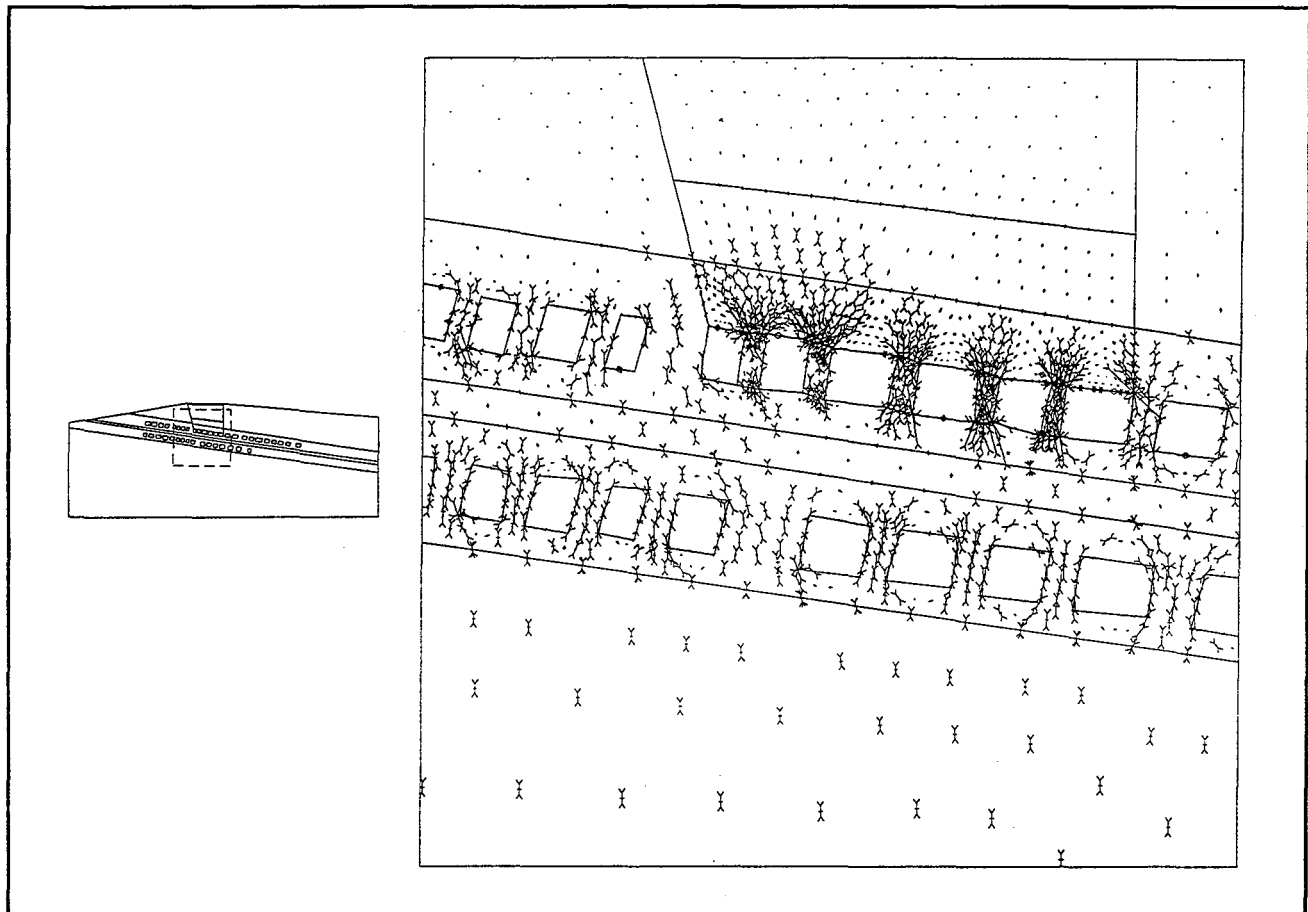


a : Contraintes principales dans tout le modèle (CESAR).

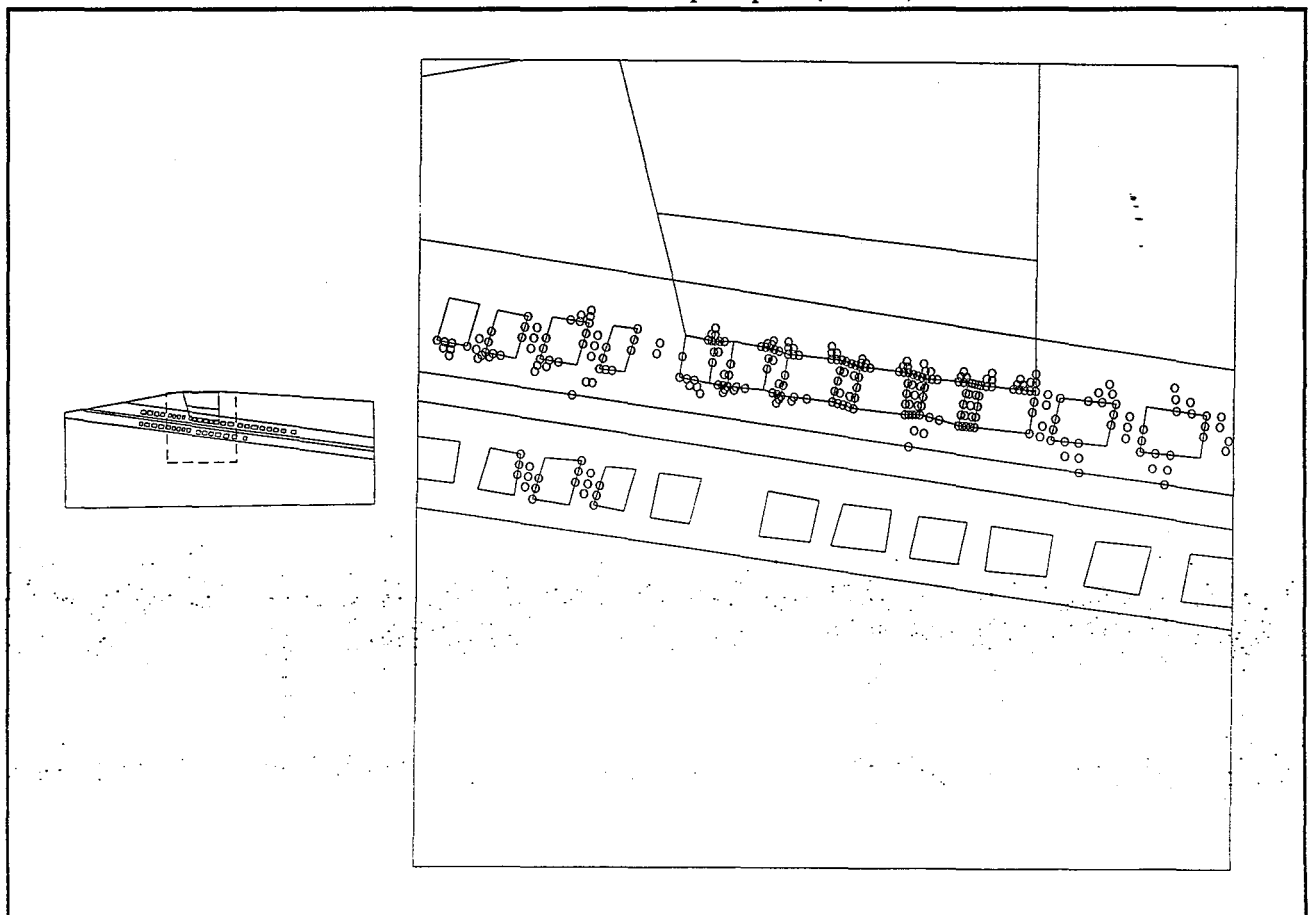


b : Points plastiques dans tout le modèle (CESAR).

Figure III.33 : Contraintes principales et points plastiques.



a : Zoom sur les contraintes principales (CESAR).



b : Zoom sur les points plastiques (CESAR).

Figure III.34 : Contraintes et plasticité dans la zone avant effondrement.

3.3.4. Conclusion

Au niveau inférieur, l'évolution de l'état de la carrière dans le temps pourrait provoquer des instabilités locales par écrasement des piliers puisqu'à l'heure actuelle, on observe environ une cinquantaine des piliers dans un état critique (BLANC P., 1992 [3]).

Par l'approche éléments finis et selon une coupe verticale passant par l'effondrement central, nous avons montré la forte sollicitation des piliers à l'aplomb de ce dernier.

Au niveau supérieur, les piliers dans la zone effondrée subissent des fortes contraintes. En effet, à cet endroit le taux de défrètement atteint 90%. L'inclinaison de la couche exploitée augmente les contraintes de cisaillement dans ces piliers.

Nous avons supposé dans l'étude par éléments finis que le milieu est continu et isotrope, or le niveau supérieur et en particulier le terrain de recouvrement a connu une fracturation naturelle et mécanique importante responsable en grande partie des instabilités observées. Pour tenir compte des discontinuités dans un modèle numérique, nous allons étudier plus loin la même carrière par des approches discontinues (la méthode des éléments distincts 2D et la méthode de l'équilibre limite 3D).

En ce qui concerne la planche intercalaire, le modèle par éléments finis montre bien que cette dernière est en état de stabilité parfaite. Elle a une puissance de 16 m, puissance très importante pour assurer la stabilité.

4. COMMENT PRENDRE EN COMPTE LES DISCONTINUITES ?

4.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet des discontinuités naturelles et induites uniquement dans un modèle bidimensionnel en faisant appel au code de calcul UDEC (Universal Distinct Element Code). Tout d'abord nous distinguerons les discontinuités naturelles et induites. Ensuite, nous parlerons des hypothèses de calcul et enfin, nous présenterons notre choix de les intégrer dans les modèles.

4.1.1. Discontinuités naturelles et induites

a) Discontinuités naturelles

Les discontinuités naturelles correspondent aux fissures géologiques. Les plans de stratification des couches sont de même des discontinuités naturelles.

Les fissures géologiques existaient avant l'ouverture de la carrière souterraine. Leur évolution est faible; elles servent de joint de dilatation au massif rocheux (calcaire, craie, gypse, dolomie etc...). elles sont souvent remplies d'argiles. Les lèvres de ces fissures sont ouvertes de quelques millimètres.

On trouve des fissures plus larges dans lesquelles une circulation préférentielle des eaux météoriques a contribué à l'élargissement de la fissure et à son remplissage par de l'argile, calcaire ou tout autre matériau.

Dans le cas des carrières souterraines sous un flanc de coteau, les fissures naturelles sont relativement nombreuses dans la zone d'entrée par infiltration des eaux de ruissellement, et souvent parallèles au flanc du coteau (fractures de déconfinement).

L'orientation de ces fissures géologiques dépend de l'orientation des contraintes principales régionales tectoniques.

b) Discontinuités induites

L'ouverture d'une carrière souterraine entraîne une fracturation artificielle par une redistribution des contraintes dans le massif rocheux. Cette fracturation est appelée fissuration mécanique.

Ces fissures sont susceptibles d'évoluer constamment dans le temps car avec le vieillissement (phénomènes d'altération) et que, sous des charges élevées, certaines roches peuvent atteindre la rupture par fluage.

Dans les cas des carrières étudiés plus haut, de nombreuses fissures de ce type ont été recensées. Elles se situent au toit et dans les piliers. Au toit, elles sont souvent sèches, ouvertes de quelques millimètres.

On observe souvent dans la dalle du toit des cassures longitudinales situées au centre des galeries, à égale distance des appuis, là où les contraintes de traction sont maximales. Cette fissuration indique que la contrainte de traction est supérieure à la résistance à la traction du matériau rocheux.

Sur les piliers, des fissures plus largement ouvertes caractérisent un état de compression excessive.

4.2. Hypothèses de calcul

La méthode des éléments distincts est une procédure numérique permettant une simulation complète des milieux discontinus en deux en trois dimensions. Cette méthode repose sur une procédure de calcul explicite. UDEC est donc en cela bien adapté pour modéliser des massifs rocheux sujets à des conditions quasi-statiques ou dynamiques.

La représentation des contacts consiste à modéliser l'interaction entre les blocs du massif rocheux. L'interaction obéit à un comportement mécanique analogue à celui de ressorts orientés perpendiculairement et parallèlement à la surface de contact et les forces mobilisées au niveau des contacts sont liées aux déplacements relatifs entre blocs.

Les blocs sont supposés déformables c'est-à-dire que chaque bloc est traité indépendamment comme un milieu continu, discrétisé en éléments continus internes (différences finies).

Les joints représentant les fissures géologiques et mécaniques sont caractérisés par des raideurs normale et tangentielle. Dans le cas d'un comportement élastoplastique d'autres paramètres interviennent tels que la résistance à la traction, la cohésion et l'angle de frottement interne du joint.

UDEC permet de calculer :

- l'effort résultant au cours d'un pas de temps donné à chaque noeud situé au niveau du contour du bloc,
- le déplacement résultant, à chaque noeud, au pas de temps suivant, en utilisant la seconde loi de Newton,
- en connaissant l'incrément de déformation correspondant au temps Δt , la relation effort-déformation dans les blocs permet de calculer directement le nouvel état de contrainte au niveau de chaque point nodal i ,
- la nouvelle position des blocs et le nouvel état de contrainte au niveau des contacts et des blocs permettent de calculer la résultante des forces et des moments qui agissent au cours du prochain cycle de calcul (Δt).

Cette procédure est répétée durant plusieurs milliers de cycles jusqu'à l'équilibre ou l'instabilité du système de blocs.

4.3. Comment peut-on choisir les discontinuités dans le modèle ?

Le choix des discontinuités naturelles ou mécaniques demande une bonne compréhension de la situation des carrières souterraines étudiées. Malgré le manque des relevés de la fracturation dans les carrières nous avons procédé de la manière suivante :

- les discontinuités stratigraphiques sont introduites dans le modèle en se basant sur des logs stratigraphiques et des coupes géologiques. Généralement, on simule ces discontinuités par des joints fictifs⁽¹⁾,
- les discontinuités naturelles et notamment celles qui ont un pendage subvertical sans ou avec remplissage sont introduites dans les modèles avec des caractéristiques mécaniques plausibles par manque de connaissance exacte de ces paramètres en pratique (RODE N., 1991 [86] et THORAVÅL A., 1989 [94]),
- de même les discontinuités induites sont introduites dans les modèles avec des caractéristiques mécaniques un peu plus faible indiquant d'une part qu'elles sont ouvertes et sèches et d'autre part évolutives en fonction du temps,
- ces deux derniers groupes de discontinuités présentent dans la plupart des cas une dispersion en ce qui concerne l'orientation d'une part et l'espacement entre fractures d'autre part.

Les fractures déterministes sont introduites dans le modèle par leur orientation et leur pendage.

Certains de ces choix peuvent paraître arbitraire mais notre but est de mettre au point et tester une méthodologie. Nous l'avons appliquée à deux cas des carrières complexes déjà traités auparavant dans l'approche par éléments finis. Un premier cas de flanc de coteau et un deuxième cas en multi-niveaux.

4.4. Cas d'une carrière souterraine sous un flanc de coteau

4.4.1. Introduction

L'apparition des fissures mécaniques ont été constatées 1985 sur les piliers E, D, A, B et C, en 1988 la propagation des fissures arrivent jusqu'au pilier F (figure III.1). Ces fissures sont orientées parallèlement au flanc de coteau et ont un pendage à peu près 45°, parallèle à la pente naturelle du versant.

Cette apparition des fractures mécaniques, leur évolution dans le temps et dans l'espace vers le fond de la carrière, ainsi que la variation possible de leur ouverture, sembleraient donc prouver l'existence d'un phénomène évolutif.

Après l'analyse par éléments finis, nous avons compris les éléments suivants.:

- une simulation par phases en commençant l'exploitation du flanc de coteau vers le fond de la carrière offre des résultats comparables aux observations visuelles et les mesures in situ au vérin plat et indique que les piliers les plus proches de l'entrée de la carrière sont fortement sollicités favorisant le cisaillement des piliers,

(1) Un joint fictif est un joint qui se caractérise par des fortes propriétés mécaniques (raideurs normale et tangentielle, résistance à la traction, cohésion et angle de frottement interne).

- les points plastiques s'alignent selon une direction oblique parallèle à la pente du flanc de coteau,

- les valeurs des contraintes principales au sein de ces piliers indiquent l'apparition des contraintes de traction mais toujours avec des amplitudes faibles en liaison avec les hypothèses du modèle continu.

Nous adoptons donc dans le modèle discontinu le calcul par phases du flanc de coteau vers le fond.

Les discontinuités mécaniques sont introduites dans les piliers proches de l'entrée de la carrière en supposant les points suivants :

- les fractures coupent tous les piliers du haut en bas en faisant un pendage de 40° à 46° comme déjà observé sur place,

- l'introduction des fractures mécaniques se fait aussi par phases pour tenir compte de l'aspect évolutif dans le temps.

Deux discontinuités stratigraphiques sont aussi introduites dans le modèle séparant la couche exploitée des deux couches au toit et au mur.

Nous avons conservé la géométrie choisie pour la première étude (approche par éléments finis). Nous avons subdivisé le terrain en trois couches horizontales avec les mêmes caractéristiques (tableau III.1).

Les conditions aux limites sont les mêmes que pour le calcul aux éléments finis ainsi que le chargement (figure III.5).

4.4.2. Les principaux résultats

Nous insistons particulièrement dans l'approche par éléments distincts sur l'effet des discontinuités sur les contraintes .

Nous présentons en premier lieu les résultats de la phase finale du calcul en ce qui concerne les contraintes principales majeures et mineures. La figure III.35 illustre les directions des contraintes principales. Les joints subdivisent les piliers en deux compartiments. Selon les coupes A-A et B-B les piliers les plus proches de l'entrée de la carrière sont plus chargés du côté Nord, que du côté Sud (figure III.1).

La figure III.36 illustre les zones les plus sollicitées autour des piliers selon les coupes A-A et B-B en ce qui concerne les points plastiques.

Le calcul par éléments finis a montré que les piliers où les fractures ont été observées, sont plus chargés, mais dans chacun des piliers la répartition des contraintes est homogène, c'est-à-dire, on ne peut pas observer la vraie sollicitation si les discontinuités sont absentes.

Le calcul par éléments distincts a mis en évidence une sollicitation plus réaliste des piliers fracturés. Chacun des piliers fracturés est subdivisé en deux parties sollicitées différemment. Par rapport à la fracture, le compartiment Nord est fortement chargé, en revanche, le compartiment Sud est en détente. Ce résultat est conforme aux résultats des essais in situ au vérin plat.

4.4.3. Conclusion

Le flanc de coteau est l'un des principaux facteurs responsable d'une telle dégradation au niveau des piliers. D'autres facteurs internes ou externes ont participé à ce déséquilibre tels que l'important taux de défrètement à cet endroit, une probable nappe souterraine et la présence des karsts (ROQUES M., 1986 [85]).

4.5. Cas d'une carrière souterraine multi-niveaux

4.5.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons modéliser un effondrement par la méthode des éléments distincts. L'élément essentiel de base est la fracturation observée au dessus du niveau supérieur.

La philosophie du modèle discontinu est comme suit :

- nous conservons le calcul par phases c'est-à-dire, la consolidation du modèle, la simulation des excavations zone par zone (6 galeries par phase) en commençant par le niveau supérieur,
- après la phase finale de creusement, nous réactivons les joints en introduisant des caractéristiques mécaniques inspirées de la bibliographie (RODE N., 1991 [86]),
- nous supposons au départ que tous les piliers dans la zone effondrée sont complètement écrasés, et donc nous simulons une grande excavation juste avant l'effondrement,
- dans une deuxième simulation, nous avons supposé que les piliers de la zone effondrée s'écrasent l'un après l'autre,
- ensuite, nous avons tenu compte de la présence de ces piliers en leur attribuant des fractures mécaniques et naturelles, ce qui permet de modéliser l'écrasement des piliers pendant l'effondrement,
- enfin, quelques simulations ont été réalisées en changeant la densité des fractures dans la zone effondrée afin de mieux expliquer la sollicitation des piliers voisins et la planche intercalaire.

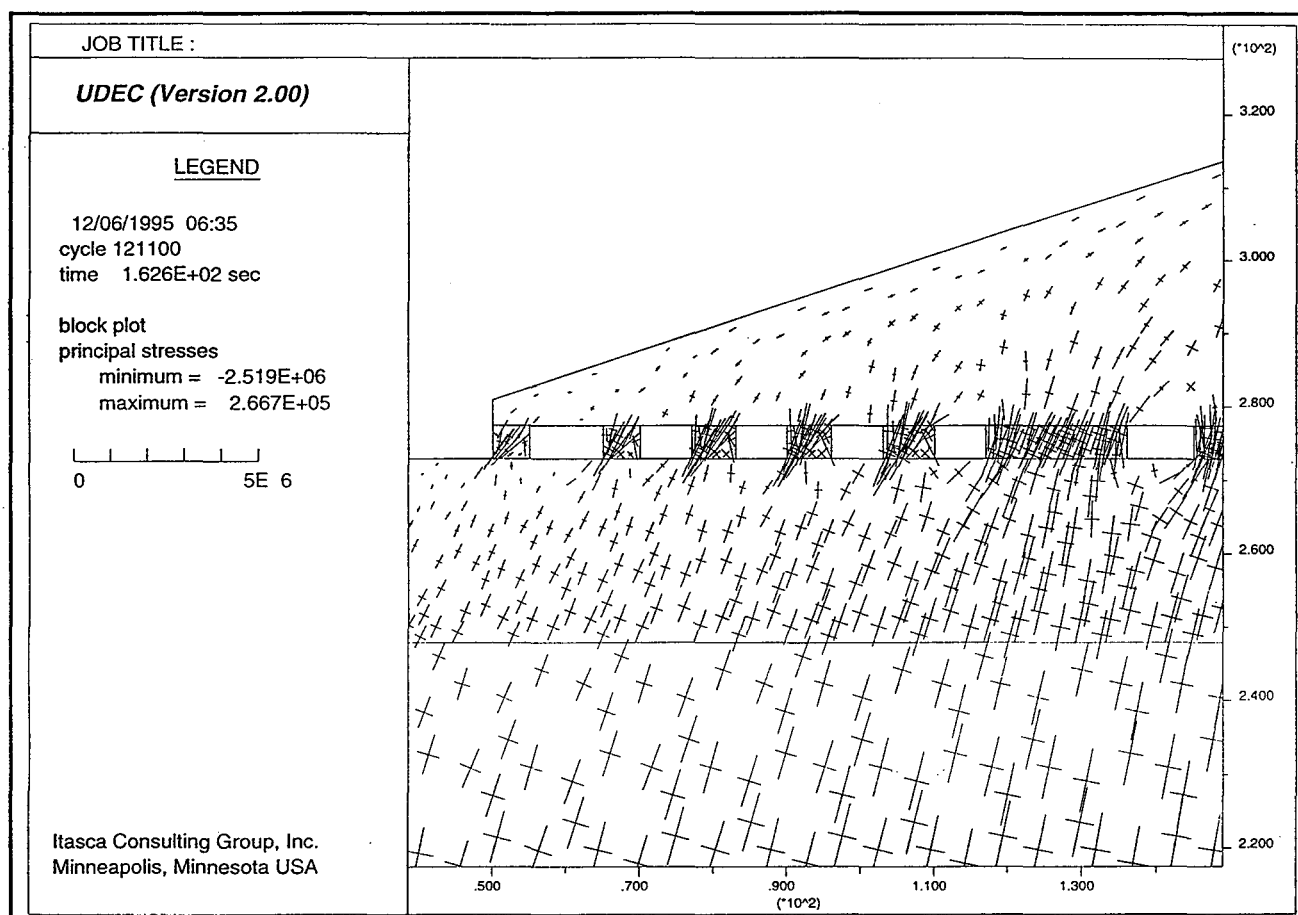
4.5.2. Résultats avant effondrement

Avant l'effondrement le modèle discontinu est comparable à celui continu par éléments finis. Toutes les fractures sont supposées fictives c'est-à-dire caractérisées par des propriétés mécaniques très élevées.

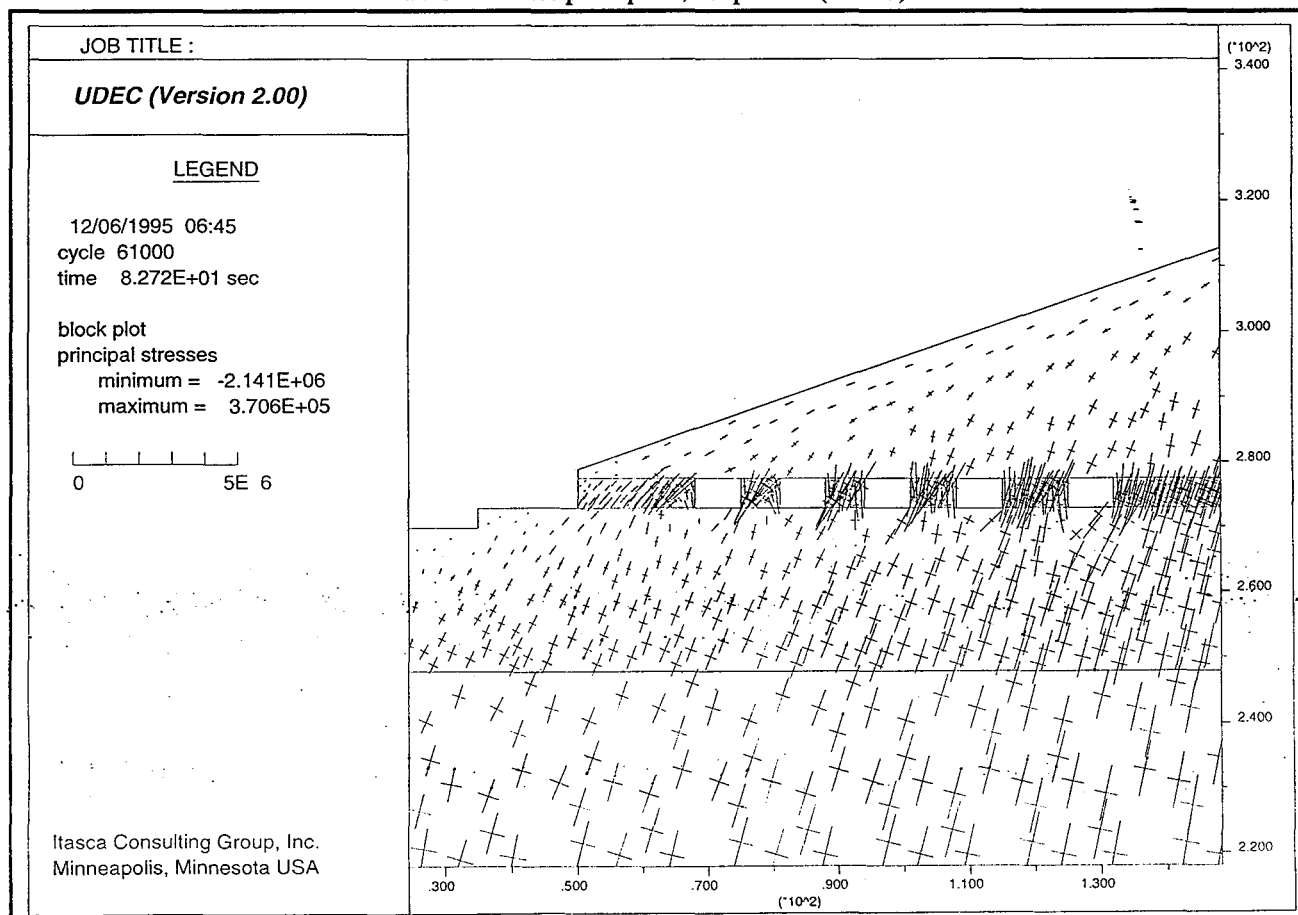
Nous trouvons presque les mêmes résultats que ceux donnés par le modèle éléments finis. Ceci n'a rien d'étonnant puisque nous avons gardé les mêmes hypothèses (déformations planes, la même coupe, les mêmes dimensions du modèle et les mêmes conditions aux limites du modèle.

Toutefois, en comparaison avec les résultats des éléments finis, nous notons 5 à 10 % d'écart entre les deux modèles en ce qui concerne les contraintes principales au sein des piliers. Les principales causes sont probablement, la différence de maillage ainsi que la finesse et bien entendu la méthode numérique appliquée pour chaque approche, l'une implicite (les éléments finis) et l'autre explicite (les éléments distincts).

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



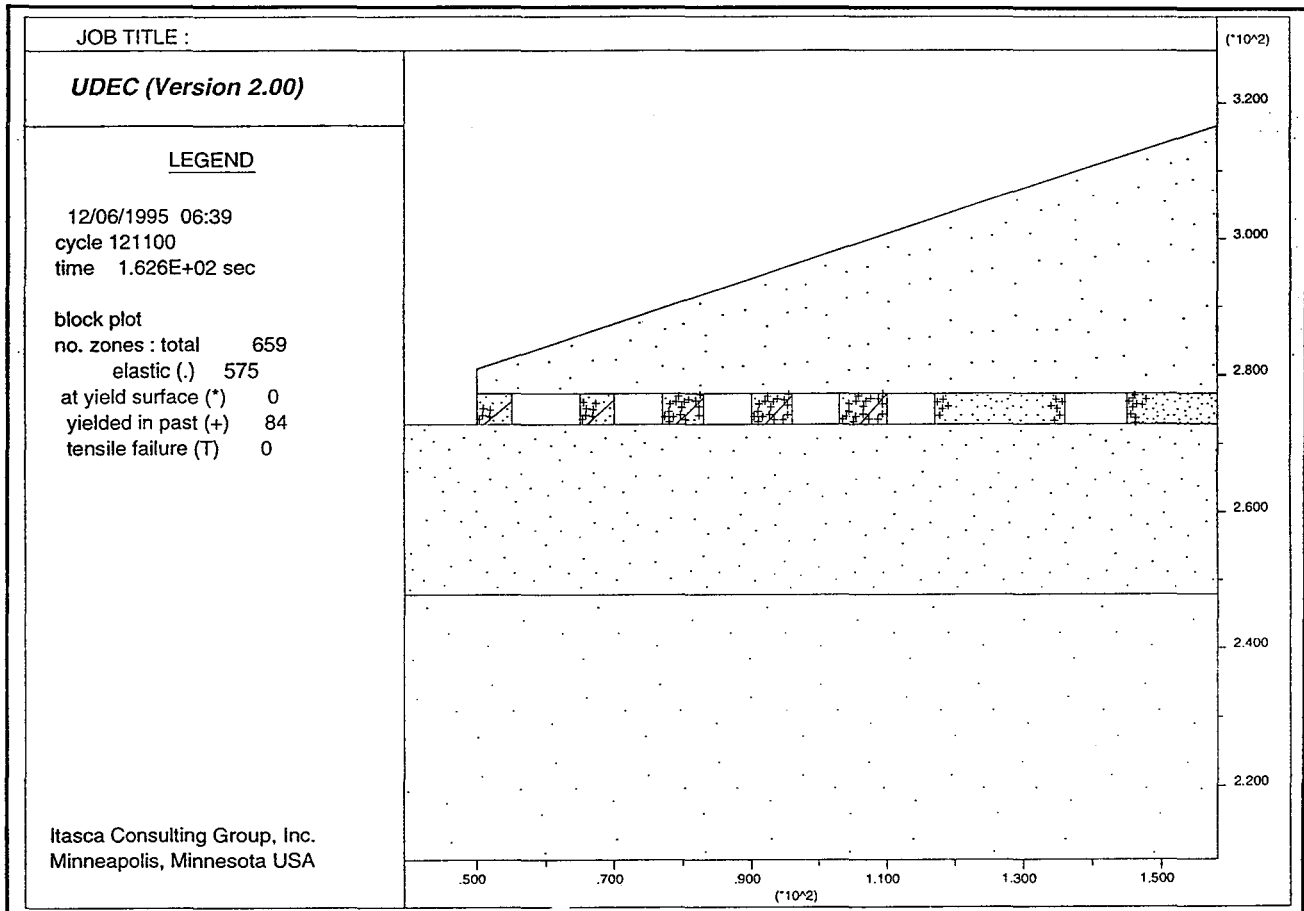
a : Contraintes principales, coupe A-A (UDEC).



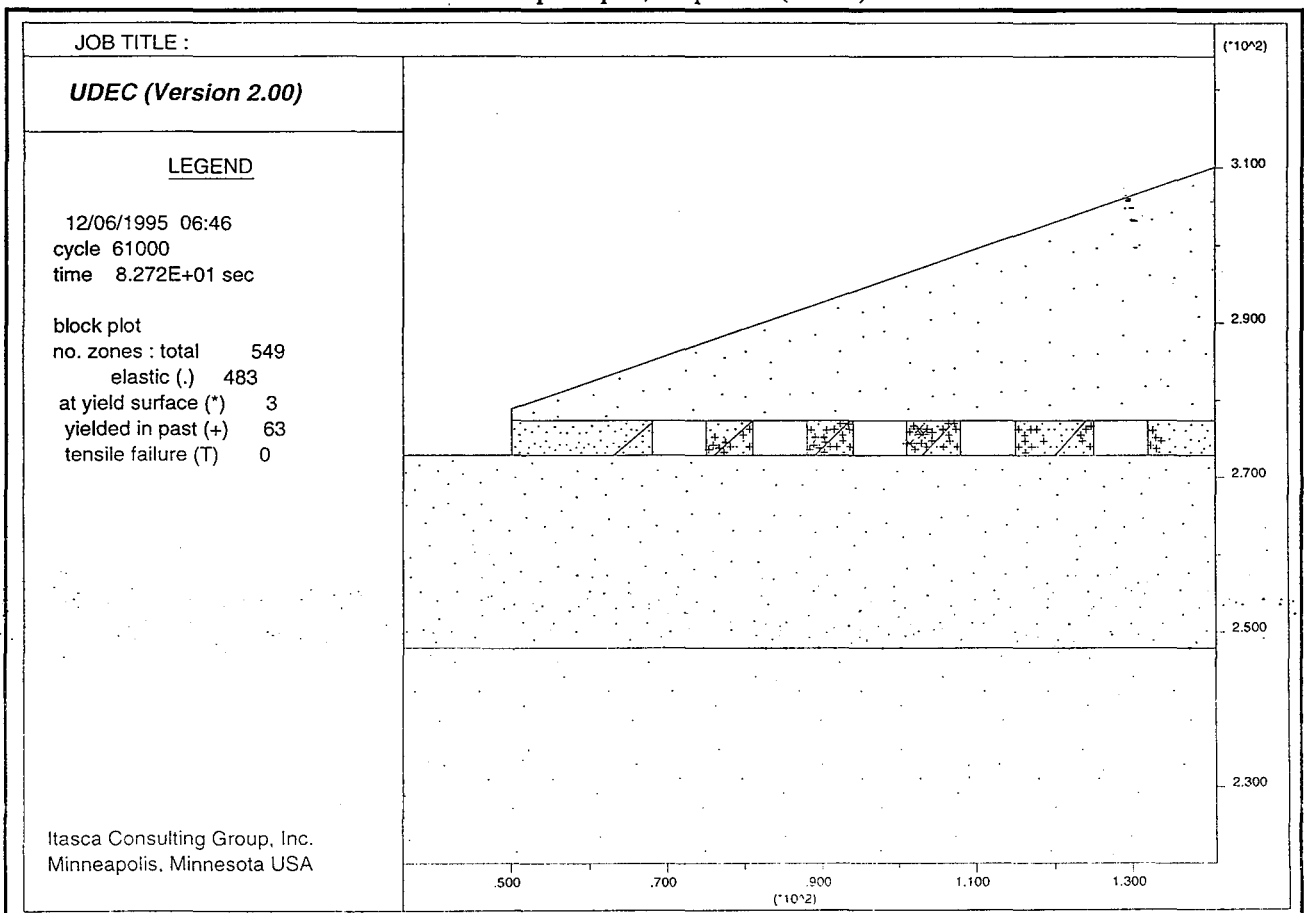
b : Contraintes principales, coupe B-B (UDEC).

Figure III.35 : Traces des contraintes principales selon les deux coupes.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



a : Points plastiques, coupe A-A (UDEC).



b : Points plastiques, coupe B-B (UDEC).

Figure III.36 : Traces des points plastiques selon les deux coupes.

4.5.3. Résultats après effondrement

Après l'effondrement le modèle discontinu montre des résultats particuliers au voisinage de ce dernier. Ce calcul est très intéressant en ce qui concerne la vie future de la carrière et notamment la résistance de la planche entre les niveaux. La figure III.37 montre le maillage du modèle ainsi que les conditions aux limites, le maillage est très dense au niveau des deux niveaux et la zone effondrée.

a) Analyse des contraintes

Nous avons choisi les deux piliers limitant l'effondrement au niveau supérieur, trois points au sein de la planche intercalaire, précisément sous l'effondrement et un pilier du niveau inférieur juste sous l'effondrement (figure III.38).

Sur la figures III.38a bis, nous observons une forte sollicitation dans les piliers à proximité de l'effondrement, la contrainte principale atteint 22 MPa après correction par le coefficient K (aire tributaire). Quant au pilier du niveau inférieur sous l'effondrement, il a subi une augmentation des contraintes d'environ 35 %.

La sollicitation avant et après effondrement n'est pas la même. La figure III.38b bis nous montre une augmentation à peu près de 50 % des contraintes au sein de la planche après effondrement.

b) Analyse des points plastiques

Les points plastiques dans ce modèle discontinu nous informent sur les zones les plus sollicitées des ouvrages souterrains. Les traces des points plastiques dépendent en fait de la densité de fracturation au toit.

Trois figures de densité de fracturation mécanique et naturelle ont été introduite dans les modèles discontinus. La figure III.39 illustre le réseau de fractures le plus proche de ce qu'on observe.

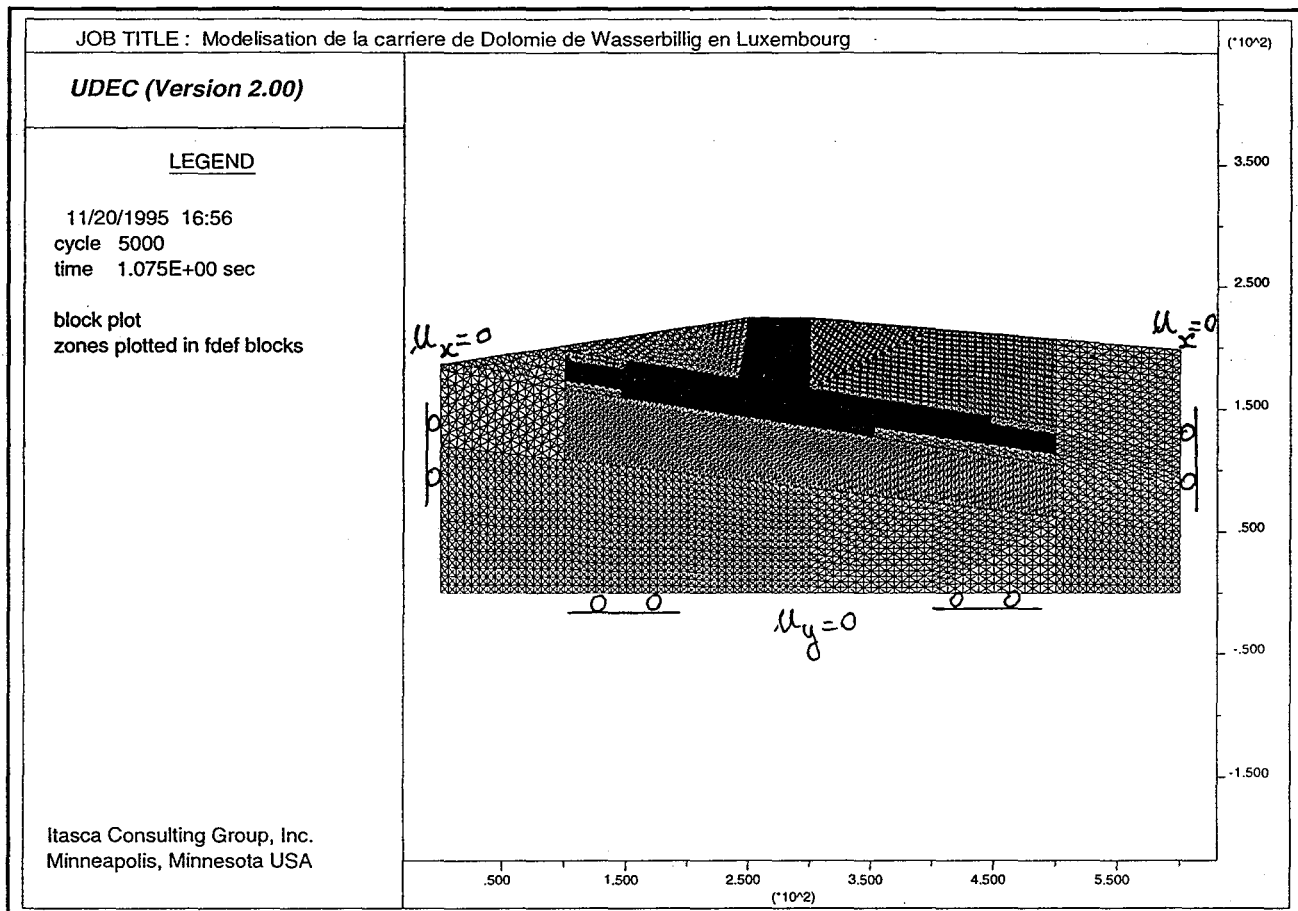
Dans ce modèle discontinu nous signalons l'apparition des points plastiques (points du modèle où les contraintes dépassent le critère de rupture) et précisément dans les zones les plus sollicitées des ouvrages souterrains. La densité de ces points plastiques dépendent de la densité de fracturation au toit (figure III.40). Deux configurations ont été simulées : une fracturation de pas moyen et une autre plus dense. On remarque que plus la densité est élevée plus le nombre des points plastiques devient grand. Dans ce cas, la déformabilité du terrains est plus importante (SINGH B., 1973 [87]) et par conséquent les piliers deviennent de plus en plus chargés, et finissent par un écrasement total. La rupture brutale de toute la zone provoque une perturbation forte au sein de la planche intercalaire et rend la partie centrale de la planche proche de la rupture (figure III.41).

Dans le cas où les piliers s'écrasent successivement, les traces des points plastiques se localisent dans deux endroits différents : le premier, les points plastiques se localisent à la base de l'effondrement. Ainsi qu'au sein du pilier limitant l'effondrement du côté droit, ce qui prouve le degré de sollicitation des piliers qui entourent l'effondrement (figure III.42).

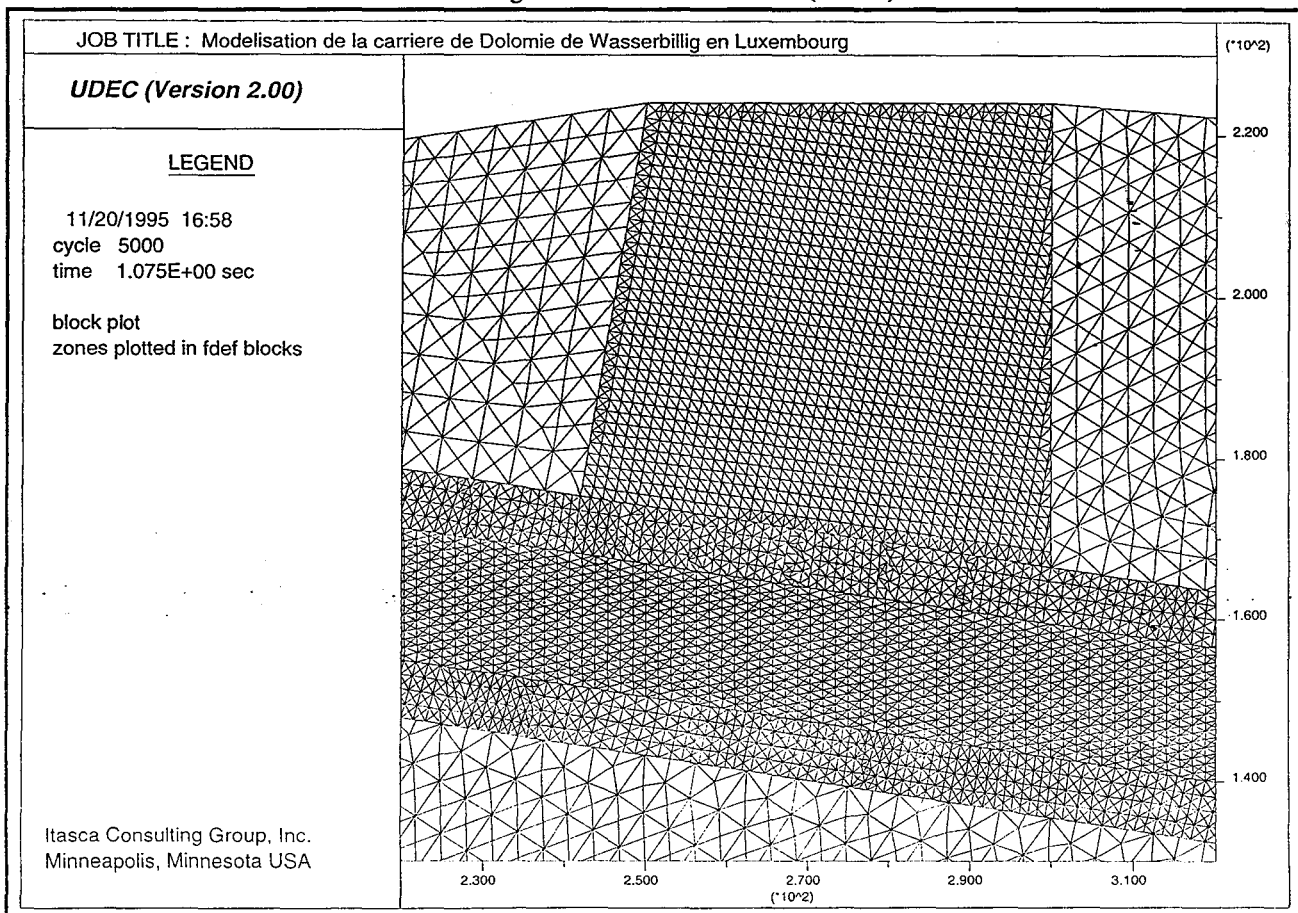
c) Conclusion

Les résultats obtenus suite à cette modélisation discontinue, montre bien l'effet de la fracturation mécanique et naturelle et de l'effondrement sur la stabilité des ouvrages souterrains. En liaison avec l'important taux de défrètement dans la zone effondrée, cette fracturation selon le modèle accélère en quelque sorte la rupture du toit et sa densité influe énormément sur le reste de la carrière et en particulier au voisinage de l'effondrement.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?

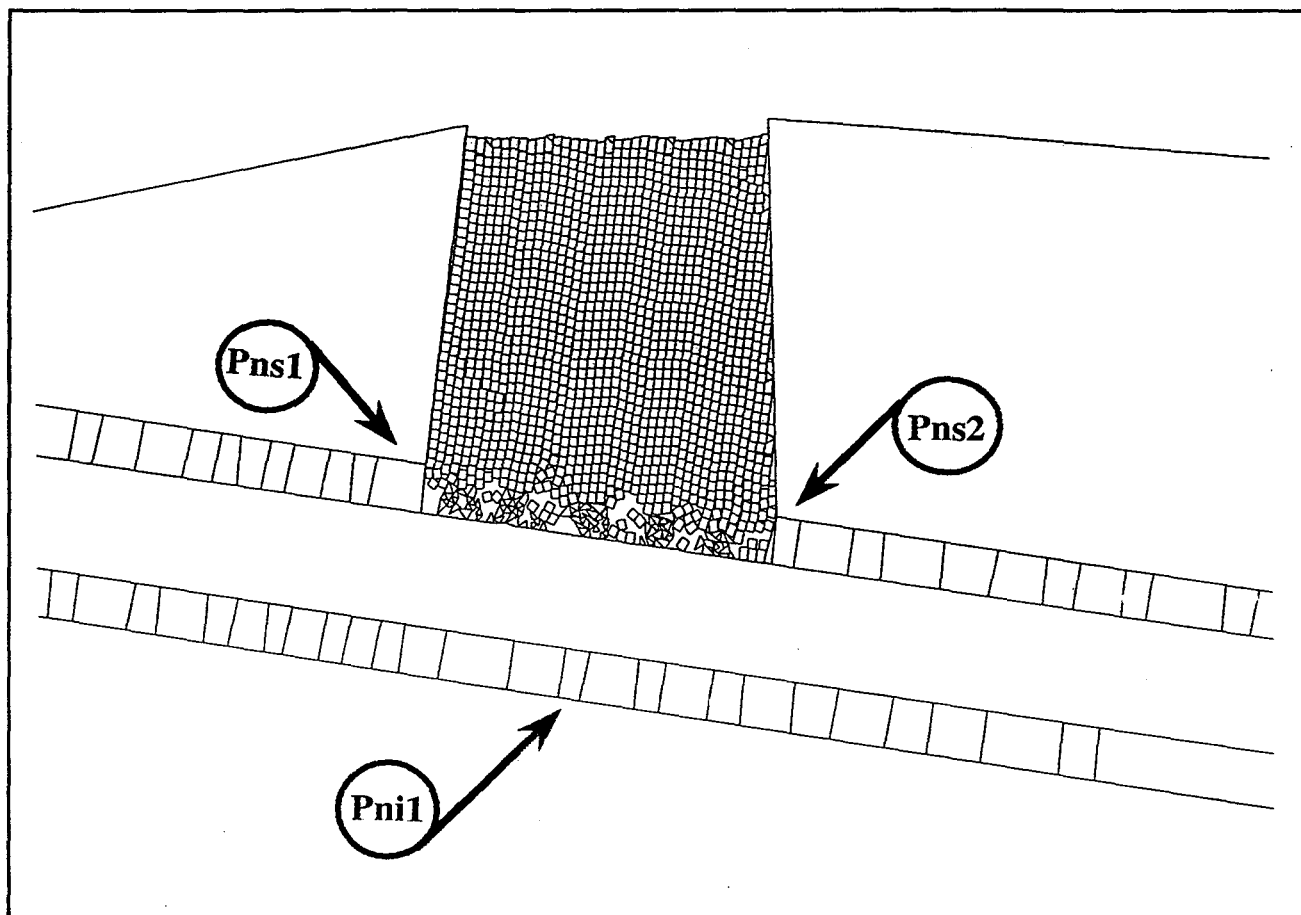


a : Maillage et conditions aux limites (UDEC).

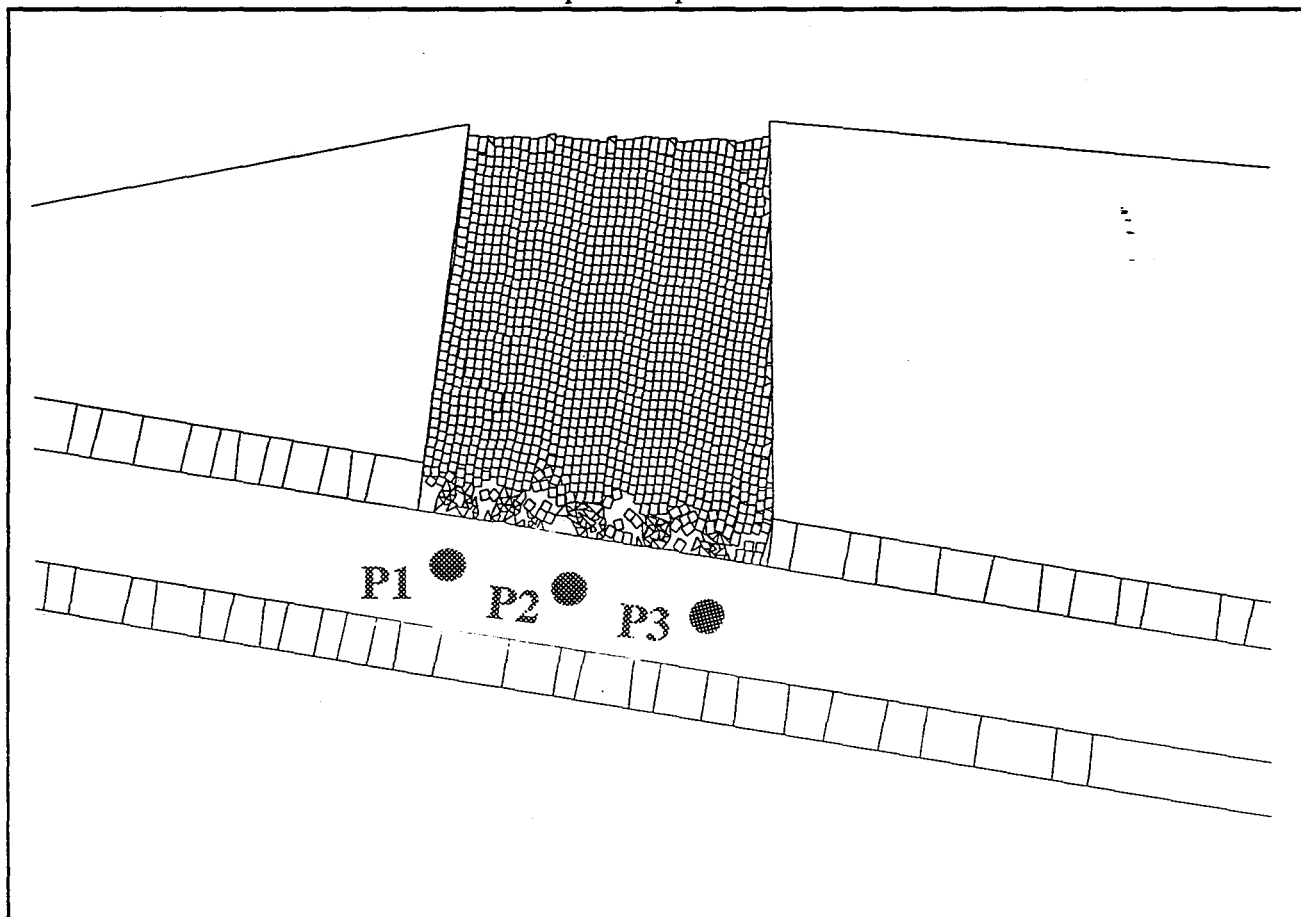


b : Zoom au niveau de l'effondrement.

Figure III.37 : Maillages et conditions aux limites.



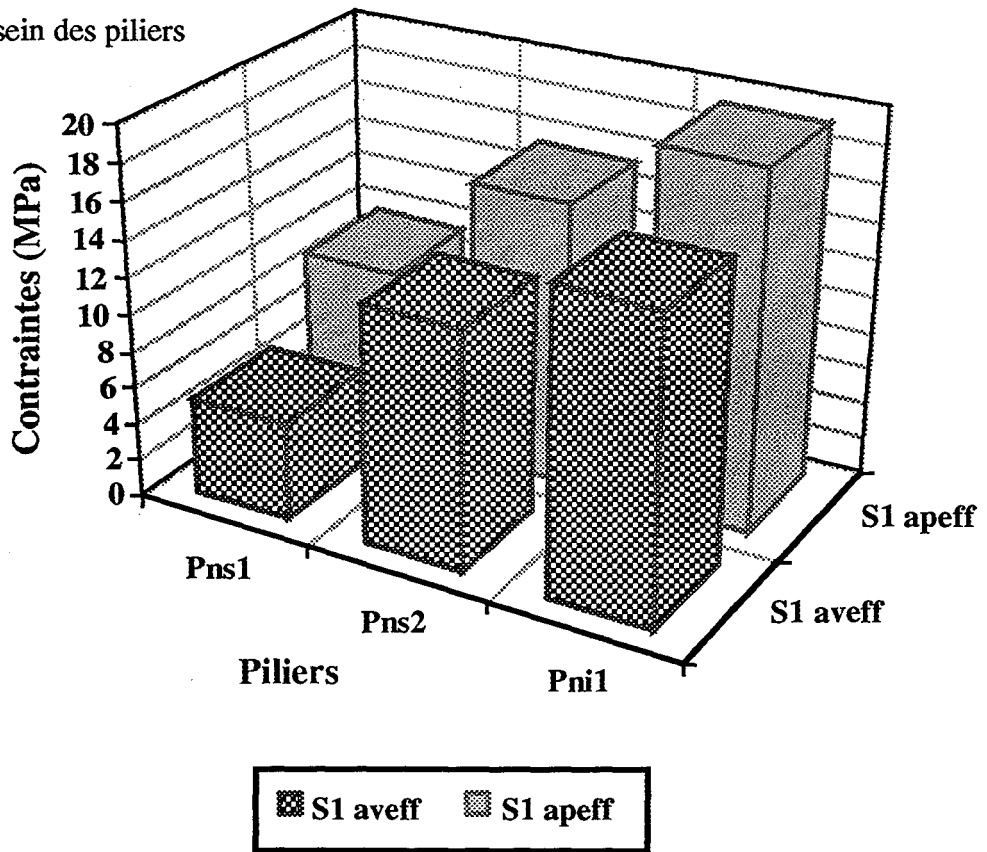
a : Les piliers les plus sollicités.



b : Localisation des points dans la planche.

Figure III.38 : Les piliers les plus sollicités et quelques points de la planche.

a : Contraintes au sein des piliers



b : Contraintes au sein de la planche

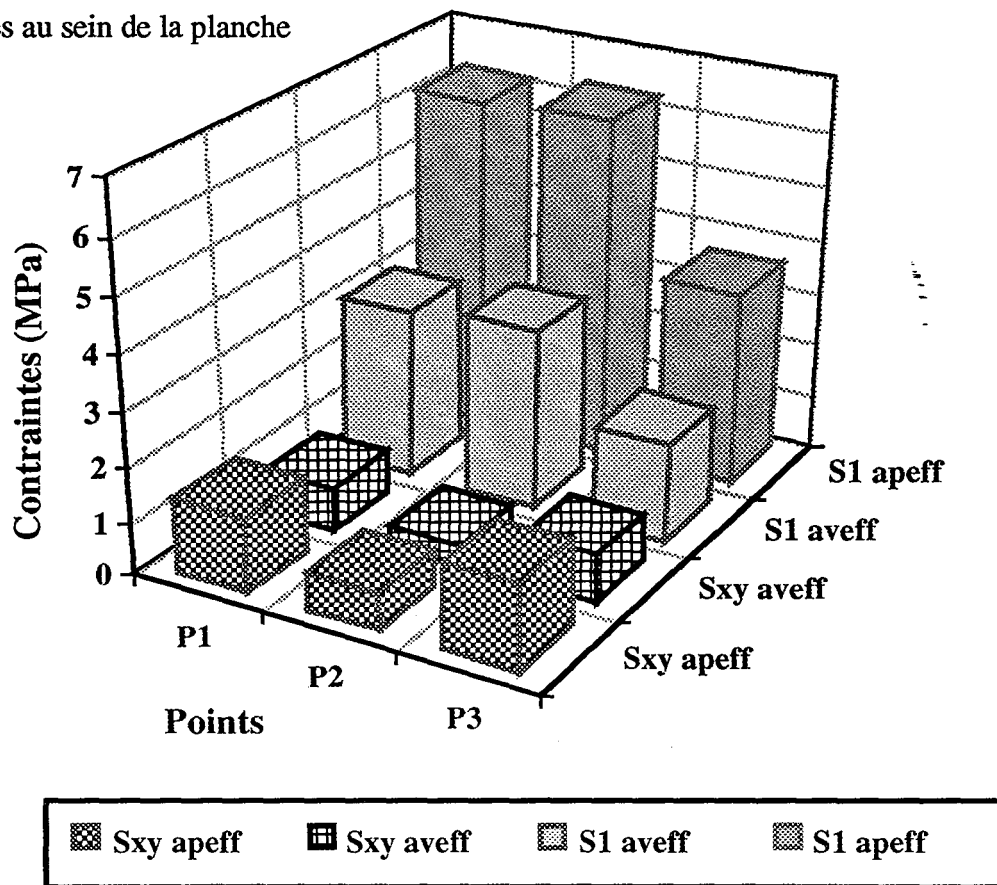
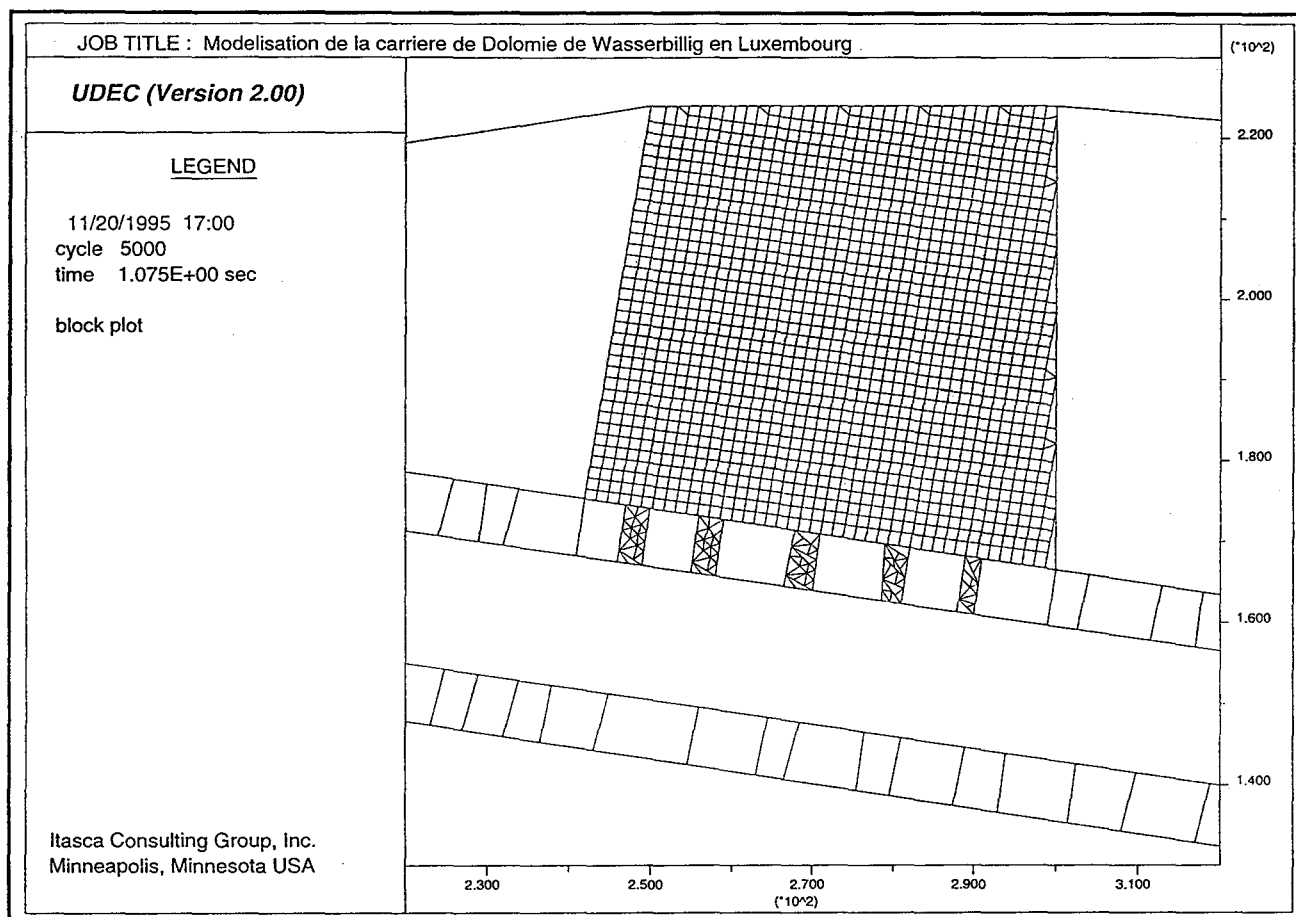
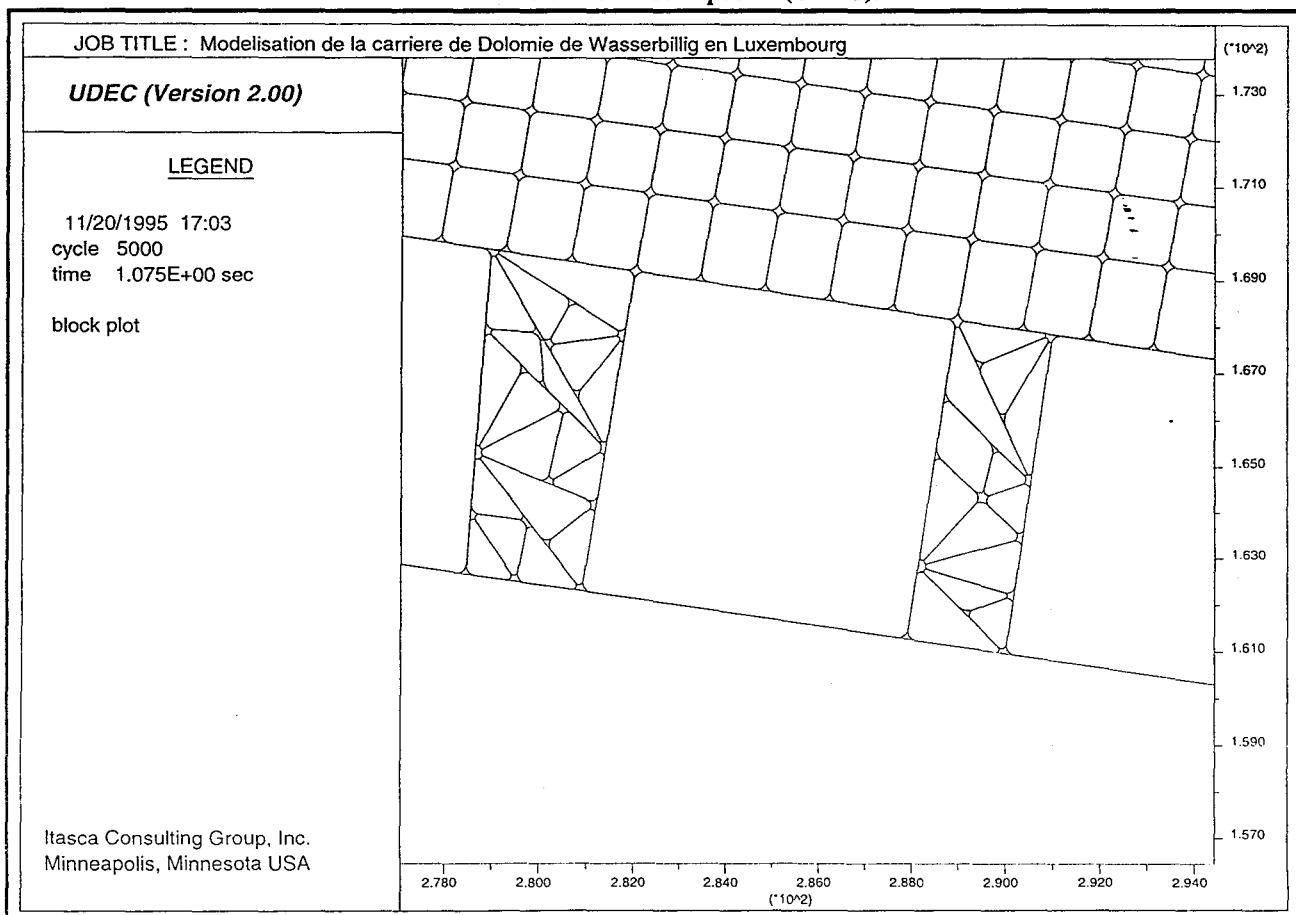


Figure III.38 bis : Contraintes au sein des piliers limites et la planche avant et après effondrement

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



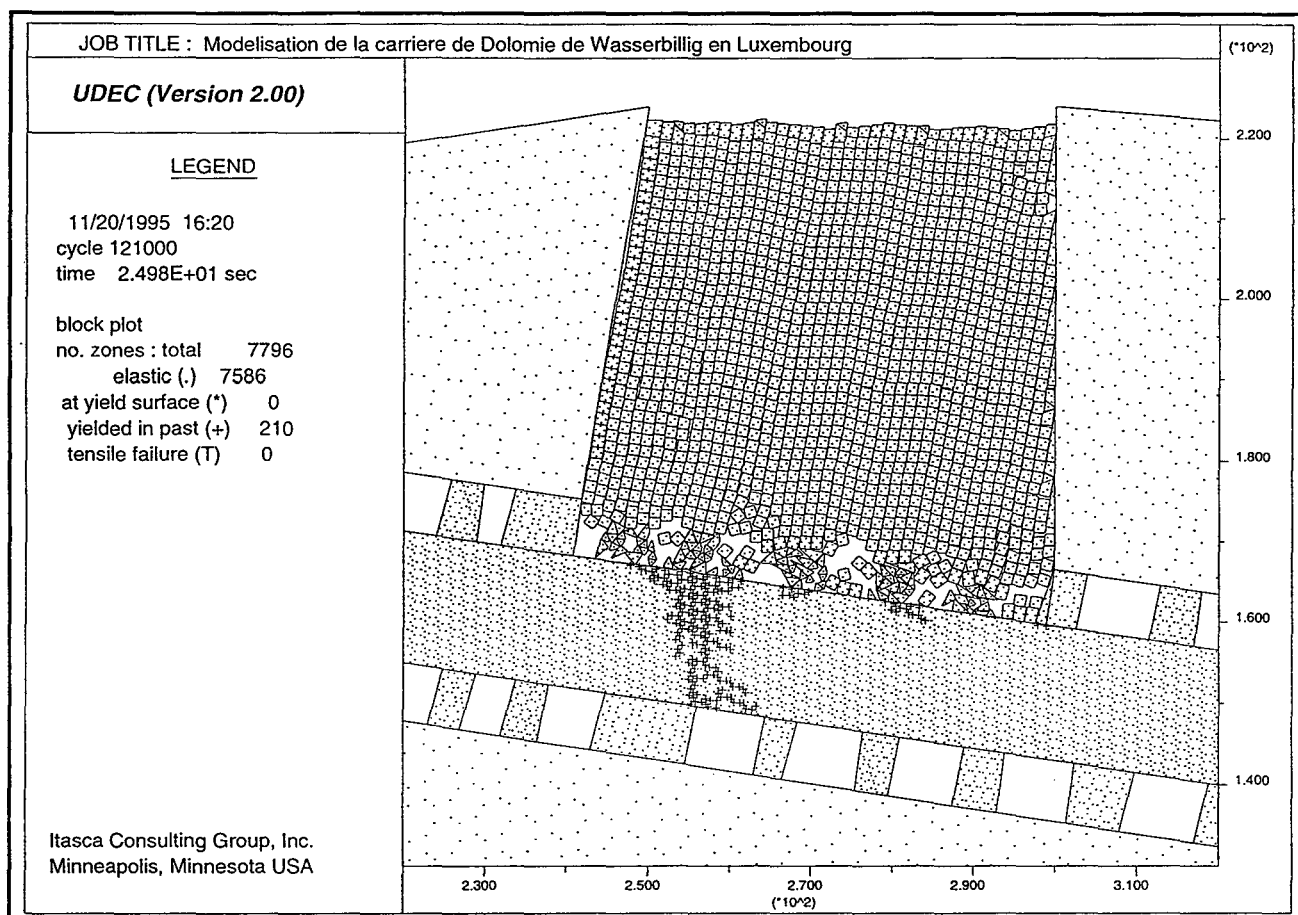
a : Réseau de fractures imposées (UDEC).



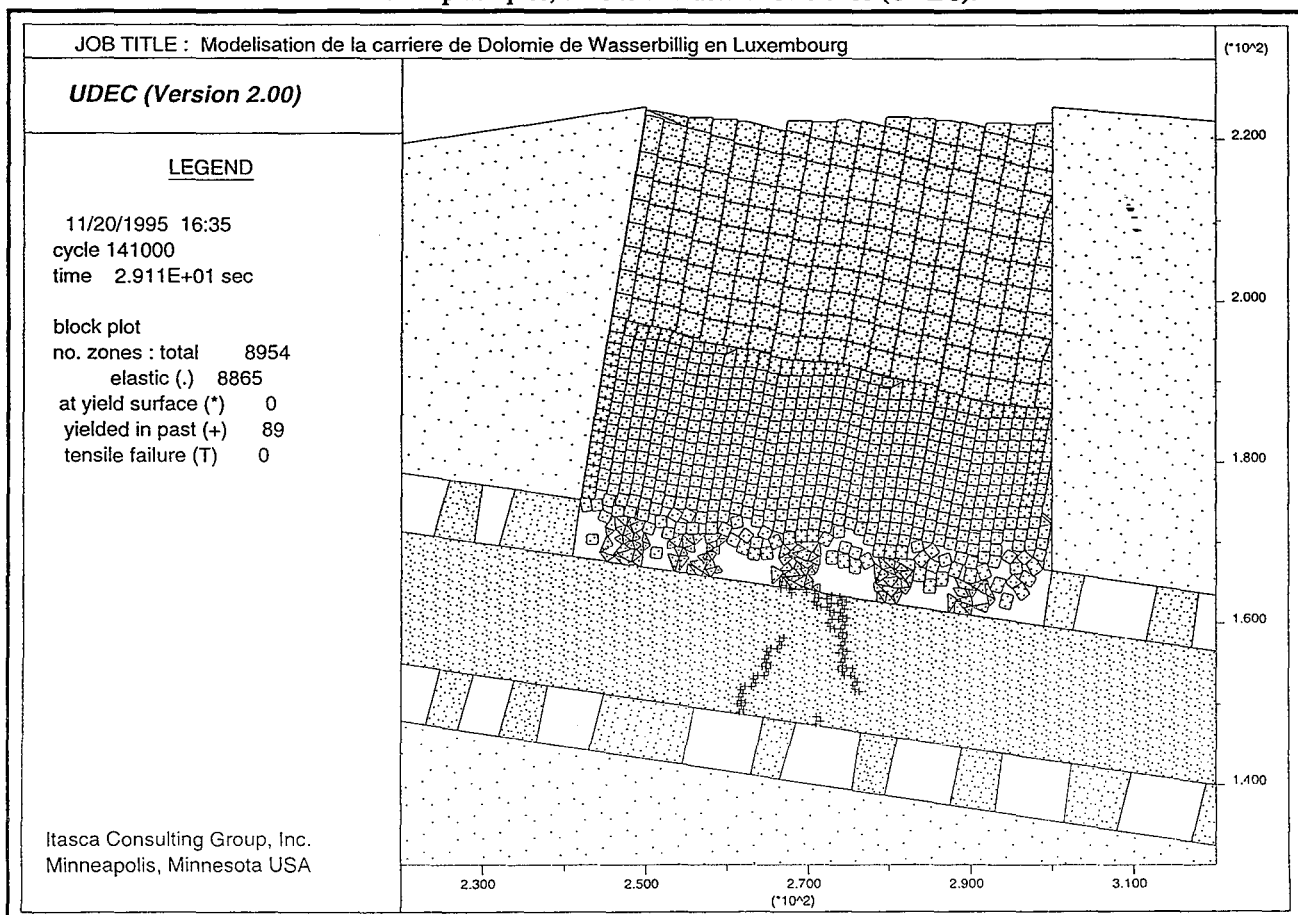
b : Zoom sur la fracturation au toit et dans les piliers (UDEC).

Figure III.39 : Réseau de fracturation introduit dans le modèle.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



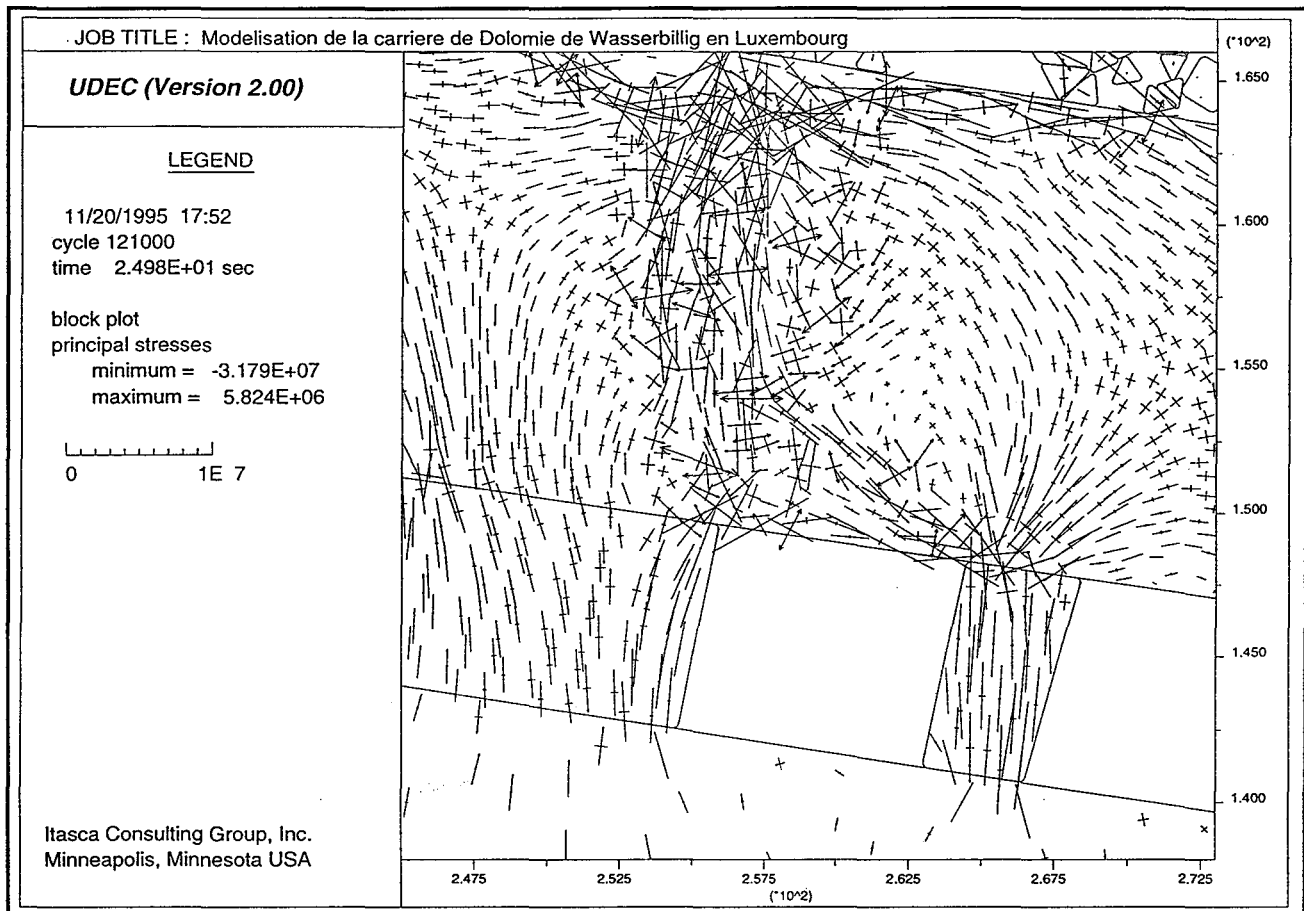
a : Points plastiques, densité de fracturation élevée (UDEC).



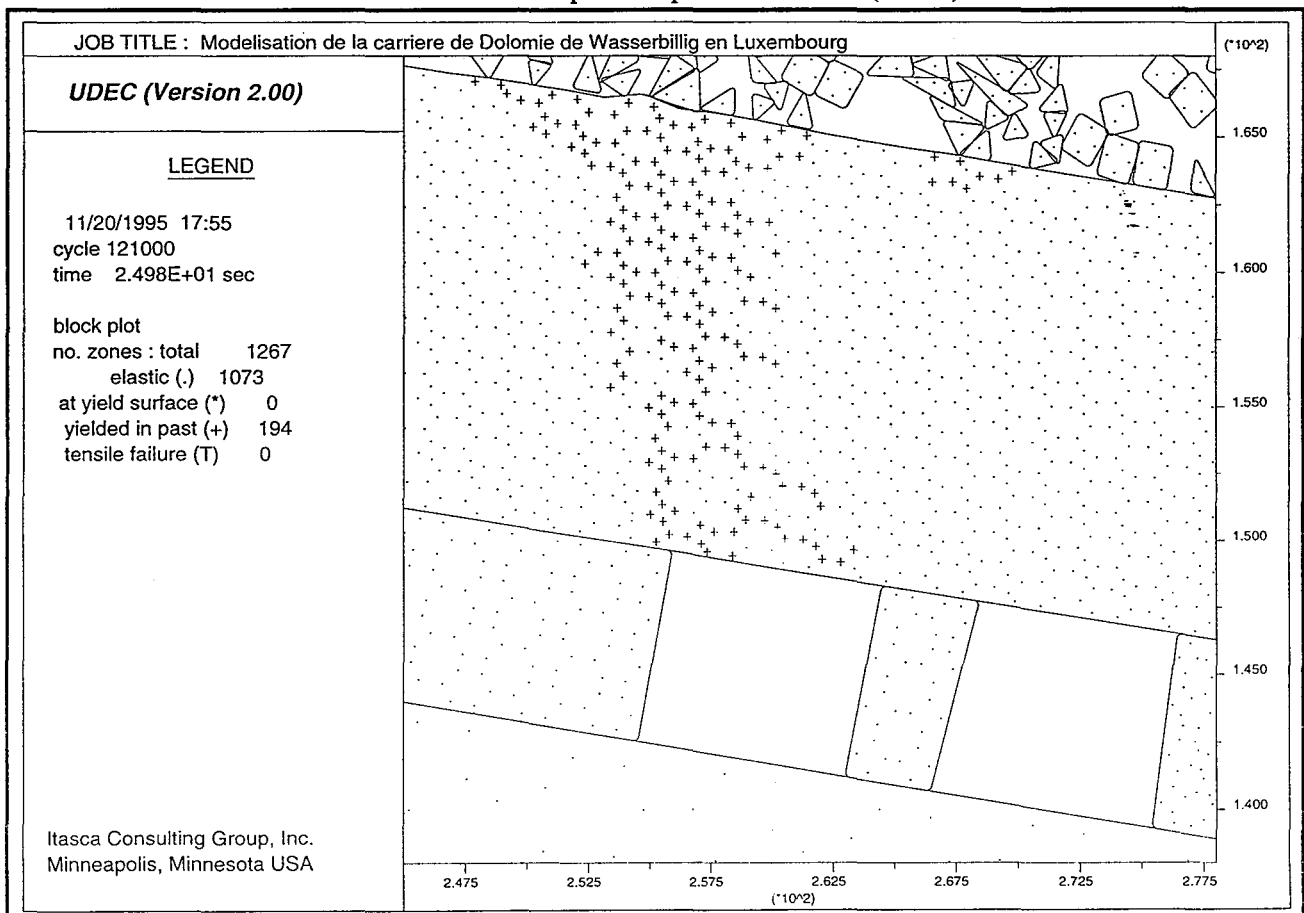
b : Points plastiques, densité de fracturation moins élevée (UDEC).

Figure III.40 : Simulation d'un effondrement, piliers très fracturés.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



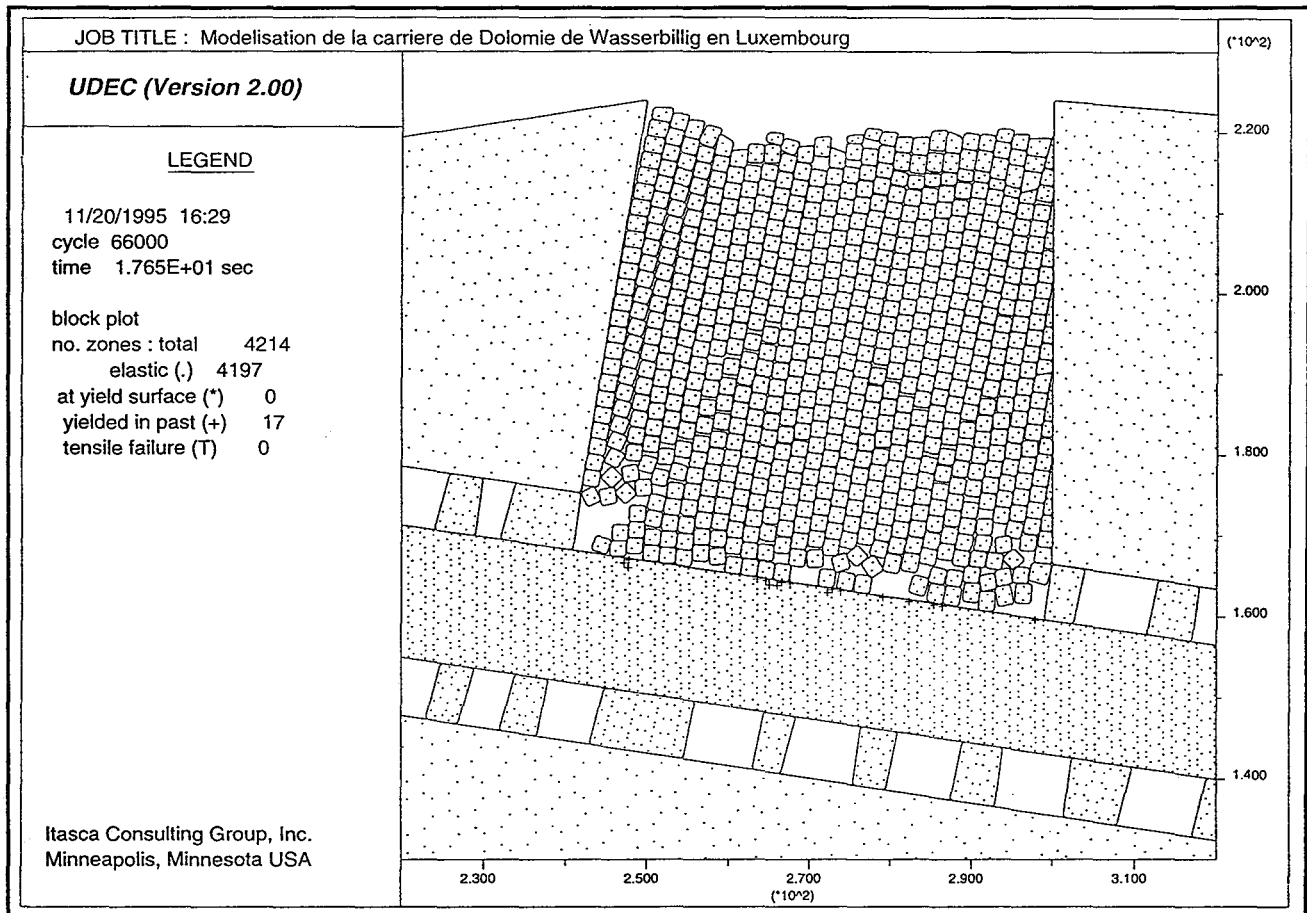
a : Sollicitation de la planche après effondrement (UDEC).



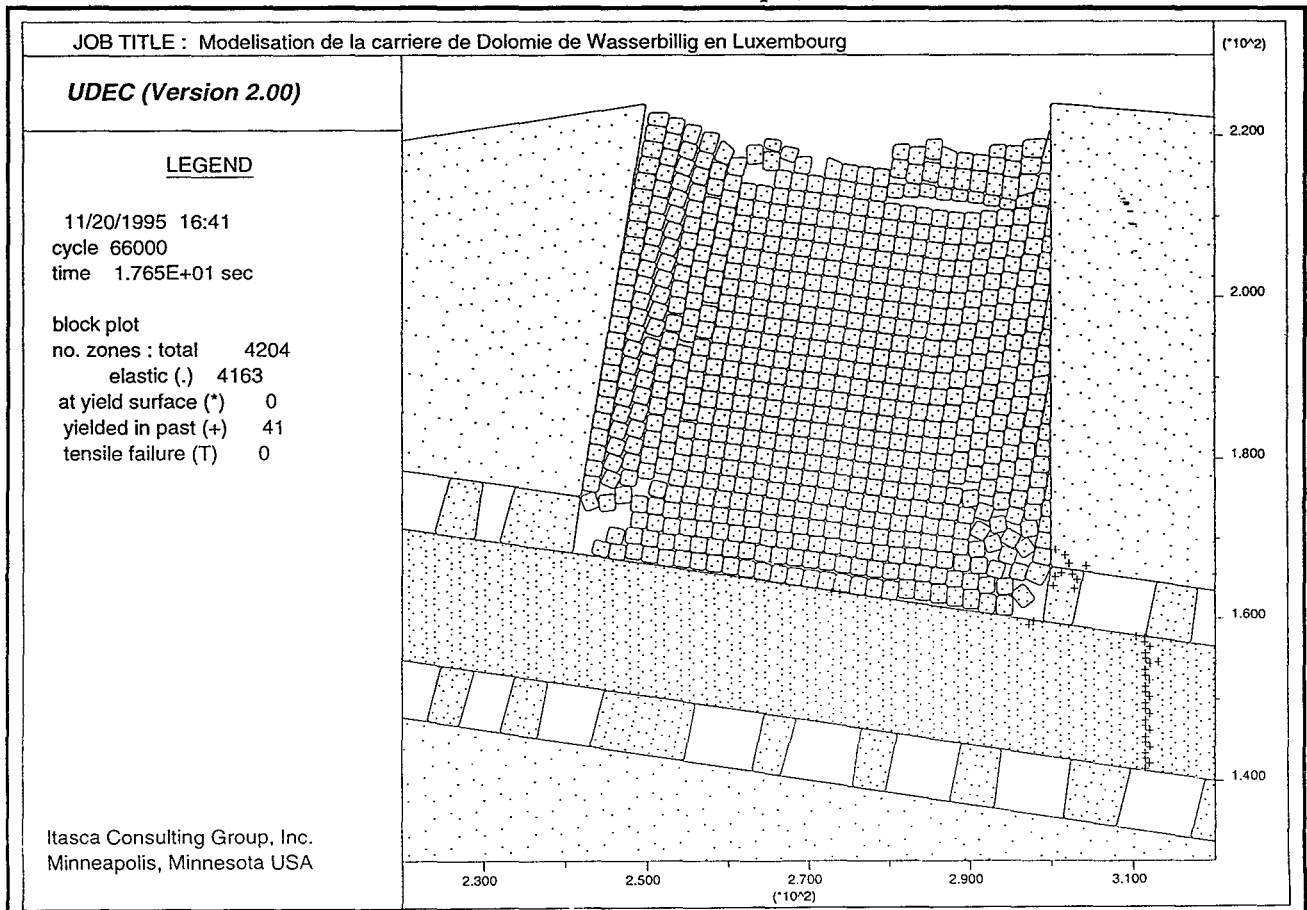
b : Zoom sur les points plastiques dans le même endroit (UDEC).

Figure III.41 : Sollicitation de la planche en terme des contraintes et de plasticité.

Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



a : Piliers écrasés en même temps (UDEC).



b : Piliers écrasés de la droite vers la gauche (UDEC).

Figure III.42 : Simulation d'un effondrement, piliers supposés écrasés.

4.5.4. Conclusion

La succession des modèles, le phasage du calcul et la reconstitution du processus de l'effondrement tel qu'il peut être imaginé ont donné des résultats intéressants pour l'analyse des mécanismes réels et met en évidence la forte sollicitation des piliers, la sensibilité de la planche intercalaire vis-à-vis de l'effondrement et la surcharge des piliers voisins par un report de charges.

Les modèles numériques bidimensionnels apportent d'une manière qualitative et quantitative l'essentiel des explications, mais reste toujours le problème de la troisième dimension. Une coupe verticale bidimensionnelle ne permet pas d'estimer la vraie sollicitation des piliers compte tenu de la méthode d'exploitation par chambres et piliers.

Pour mieux estimer le tenseur des contraintes, nous avons procédé à un calcul tridimensionnel suivant des approches différentes, les résultats des calculs et d'éventuelles comparaisons entre les modèles seront présentés dans ce qui suit.

5. COMMENT TENIR COMPTE DE LA TROISIEME DIMENSION ?

5.1. Cas d'une carrière souterraine sous un flanc de coteau

5.1.1. Introduction

Une étude bidimensionnelle ne permet pas d'appréhender les phénomènes dans leur vraie dimension sous l'hypothèse de déformation plane et notamment en ce qui concerne les carrières souterraines exploitées par chambres et piliers abandonnés. Pour cette raison, nous avons procédé à une étude tridimensionnelle pour évaluer la vraie sollicitation des piliers ainsi que l'erreur commise quand on travaille en deux dimensions et comparer les résultats des trois codes de calculs (CESAR-LCPC, UDEC et 3DEC).

Nous avons choisi pour cette démonstration une carrière souterraine, dans laquelle nous avons une géométrie plus ou moins régulière, sans effondrements et sans dégradation dans le toit, à l'exception des fractures mécaniques affectant les piliers à l'entrée de la carrière (figure III.1).

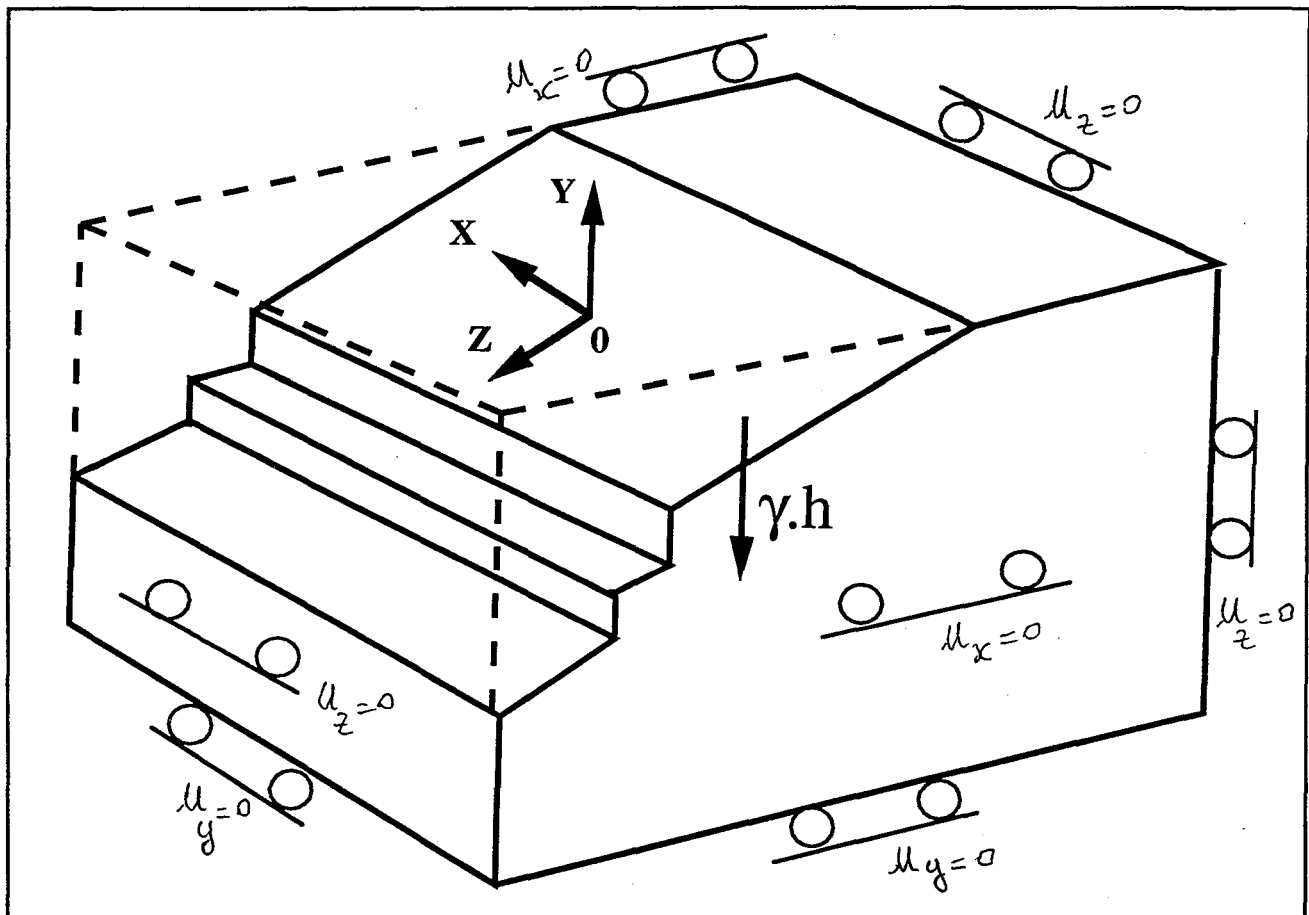
5.1.2. Le modèle

Le modèle tridimensionnel est un modèle particulier qui se rapproche de la géométrie réelle de la carrière souterraine. Pour le mettre en oeuvre, nous avons suivi la démarche suivante :

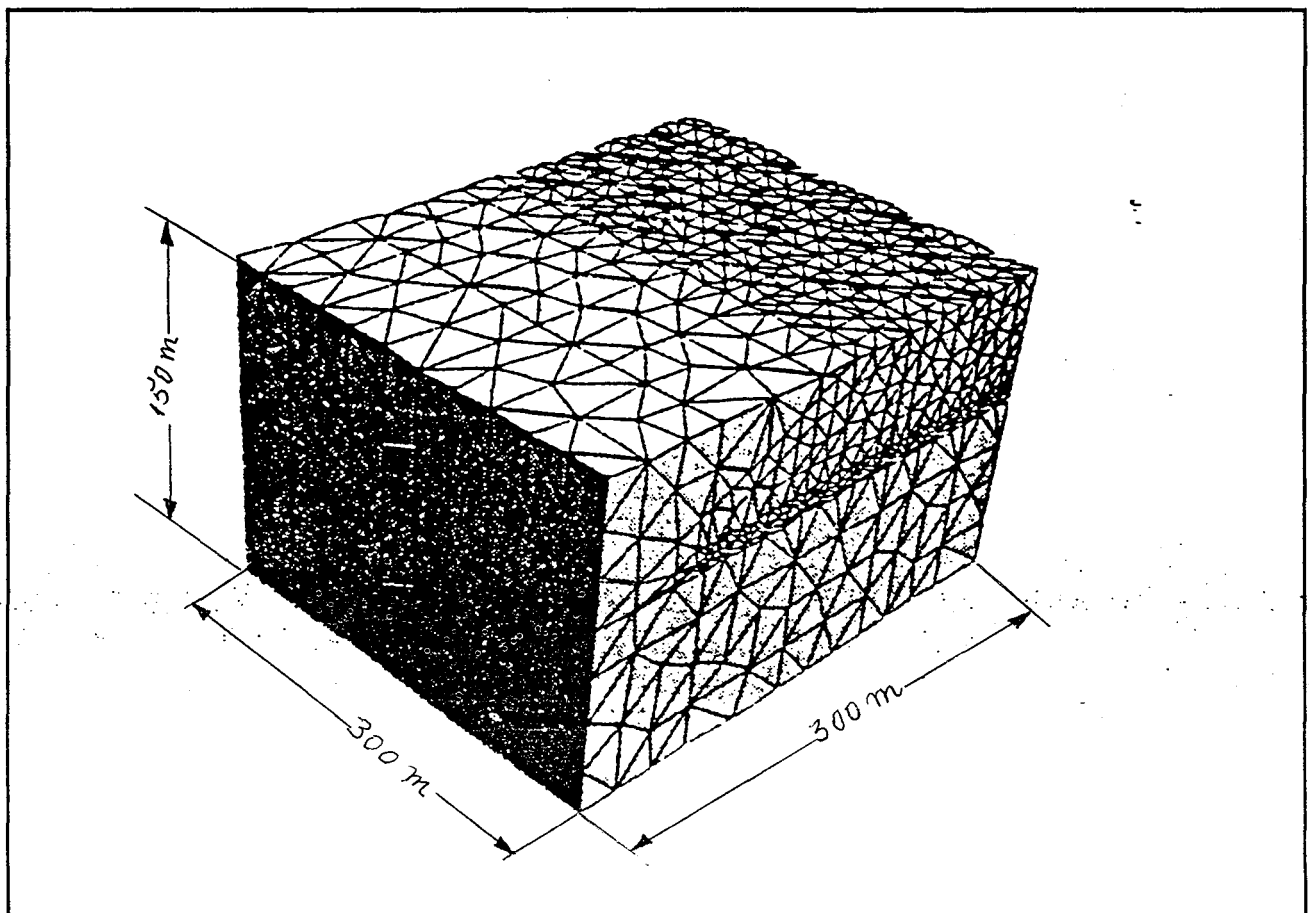
- nous avons choisi la géométrie du modèle qui se rapproche le plus de la géométrie réelle de la carrière souterraine,
- nous avons suivi la même démarche que celle qui a été appliquée dans les modèles bidimensionnels, c'est à dire, consolidation, creusement du flanc de coteau et excavation par phases. L'excavation par phases consiste à créer des vides en se basant sur l'histoire d'exploitation,
- la phase finale tient compte des fractures mécaniques dans les piliers proches de l'entrée de la carrière, en gardant les mêmes hypothèses de calcul utilisés lors du modèle bidimensionnel.

Nous avons utilisé le code de calcul 3DEC. Il est basé sur la méthode des éléments distincts comme le code UDEC. Il permet d'étudier le comportement d'un assemblage de blocs (ITASCA, 1991, 1992, 1993 [68]).

Le modèle adopté est présenté sur la figure III.43. Ses dimensions globales sont présentées aussi sur la même figure. Dans le code 3DEC, l'axe OY est supposé vertical, OZ vers le Nord et OX vers l'Est.

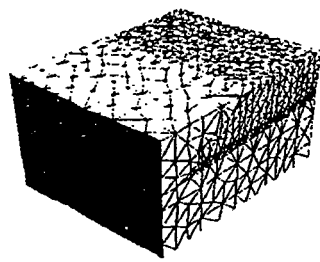


a : Conditions aux limites en 3D.

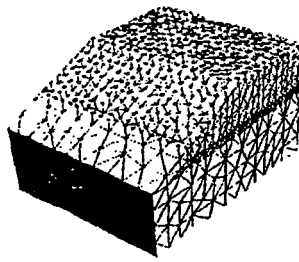


b : Maillage en 3D avant flanc de coteau.

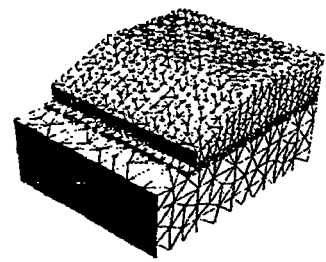
Figure III.43 : Conditions aux limites et maillage en 3D.



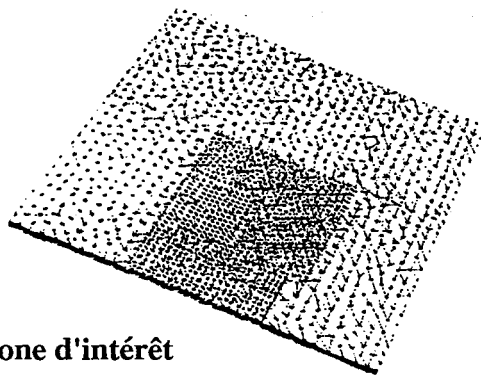
Etat initial



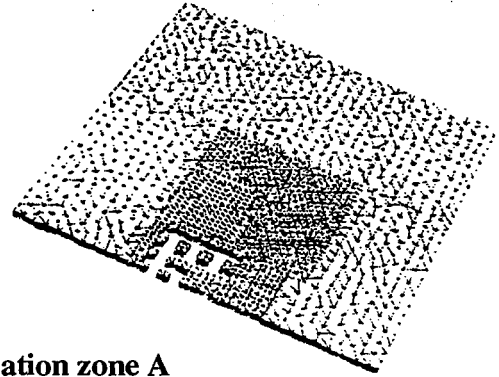
Flanc de coteau



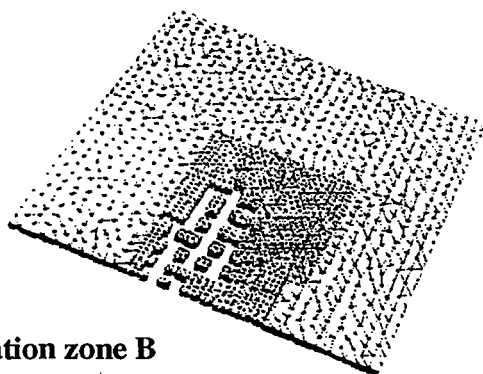
Route et falaise



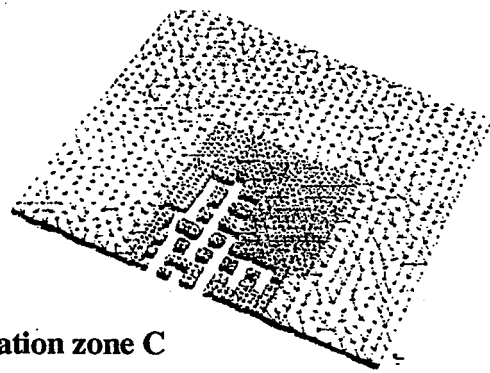
Zone d'intérêt



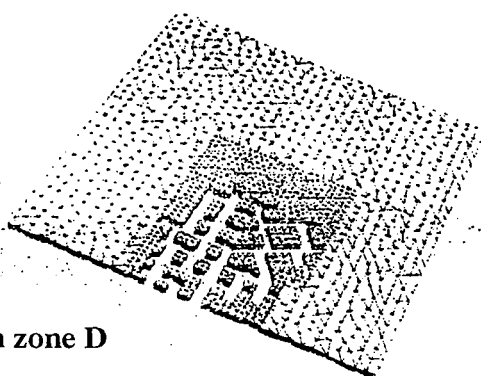
Excavation zone A



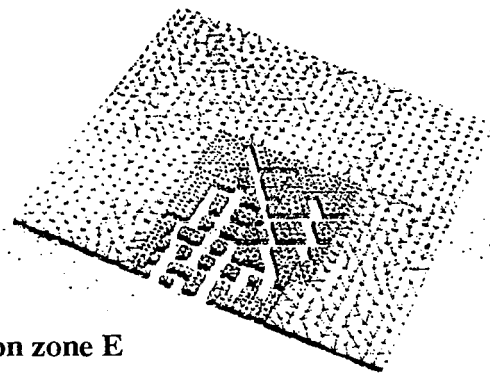
Excavation zone B



Excavation zone C



Excavation zone D



Excavation zone E

Figure III.44 : Les différentes étapes pour un calcul en 3D par phases (3DEC)

Nous avons conservé le choix de trois couches comme dans la partie précédente, une au mur, une au toit et la couche exploitée. Tous les joints séparant les blocs sont des joints fictifs, à partir de la consolidation jusqu'à la phase finale de creusement de la carrière. Dans la phase finale de calcul, nous avons introduit des joints avec des caractéristiques faibles simulant les fractures mécaniques dans les piliers. Les différentes étapes du calcul sont présentées sur la figure III.44.

Ce modèle comprend au total 725 blocs. Tous les blocs sont supposés totalement déformables. Il y a dans ce modèle 10875 éléments et 18638 noeuds. Les éléments sont de type tétraédriques à quatre noeuds.

Sur les quatre faces latérales du modèle, nous avons imposé des déplacements horizontaux nuls. A la base du modèle, les déplacements verticaux sont également nuls. Seule la face supérieure du modèle est libre. Le modèle est chargé avec le poids propre des terrains lors de la phase initiale.

Nous avons effectué le calcul avec les mêmes caractéristiques mécaniques que celles utilisées auparavant pour les calculs bidimensionnels. Le code 3DEC utilise les mêmes modules que UDEC, tels que le module de cisaillement (G) et le module de déformation volumique (K) comme données du modèle, qui remplacent le module d'Young (E) et le coefficient de poisson (ν) (ITASCA, 1991, 1992, 1993 [67]).

5.1.3. Les principaux résultats

Dans ce modèle en 3D, chacun des piliers est maillé par une dizaine d'éléments tétraédriques à quatre noeuds. A la fin du calcul, dans chaque élément, on aura le tenseur des contraintes principales.

Nous avons donc calculé un tenseur moyen des contraintes principales sur l'ensemble des éléments de chaque pilier ainsi que la rotation moyenne de la contrainte principale majeure par rapport à la verticale. Nous avons subdivisé chaque piliers en trois parties (haut, milieu et bas). Connaissant le nombre d'éléments dans chaque partie, on peut estimer une valeur moyenne des contraintes principales ainsi que leur rotation.

Les figures III.45, ..., III.50 illustrent les tenseurs de contraintes principales avant et après fracturation mécanique des piliers les plus proche de l'entrée de la carrière (figure III.1).

La contrainte principale majeure dans les deux cas fait à peu près 15° à 25° avec la verticale. Les contraintes principales intermédiaire et mineure subissent la même rotation.

Après fracturation et sur les piliers affectés par les fractures mécaniques, les contraintes principales intermédiaire et mineure deviennent des contraintes de traction.

Ce modèle tridimensionnel est en concordance avec les modèles bidimensionnels (continu et discontinu) en ce qui concerne les points suivants :

- la déviation de la contrainte principale majeure par rapport à la verticale sous l'influence du flanc de coteau,
- les piliers proches de l'entrée de la carrière subissent une forte sollicitation avant fracturation mécanique;
- après fracturation, les compartiments du côté Nord des piliers proches de l'entrée de la carrière deviennent plus sollicités.

Ce modèle permet de mieux estimer les contraintes et notamment :

- une bonne estimation du tenseur des contraintes, en introduisant la géométrie réelle de la carrière,

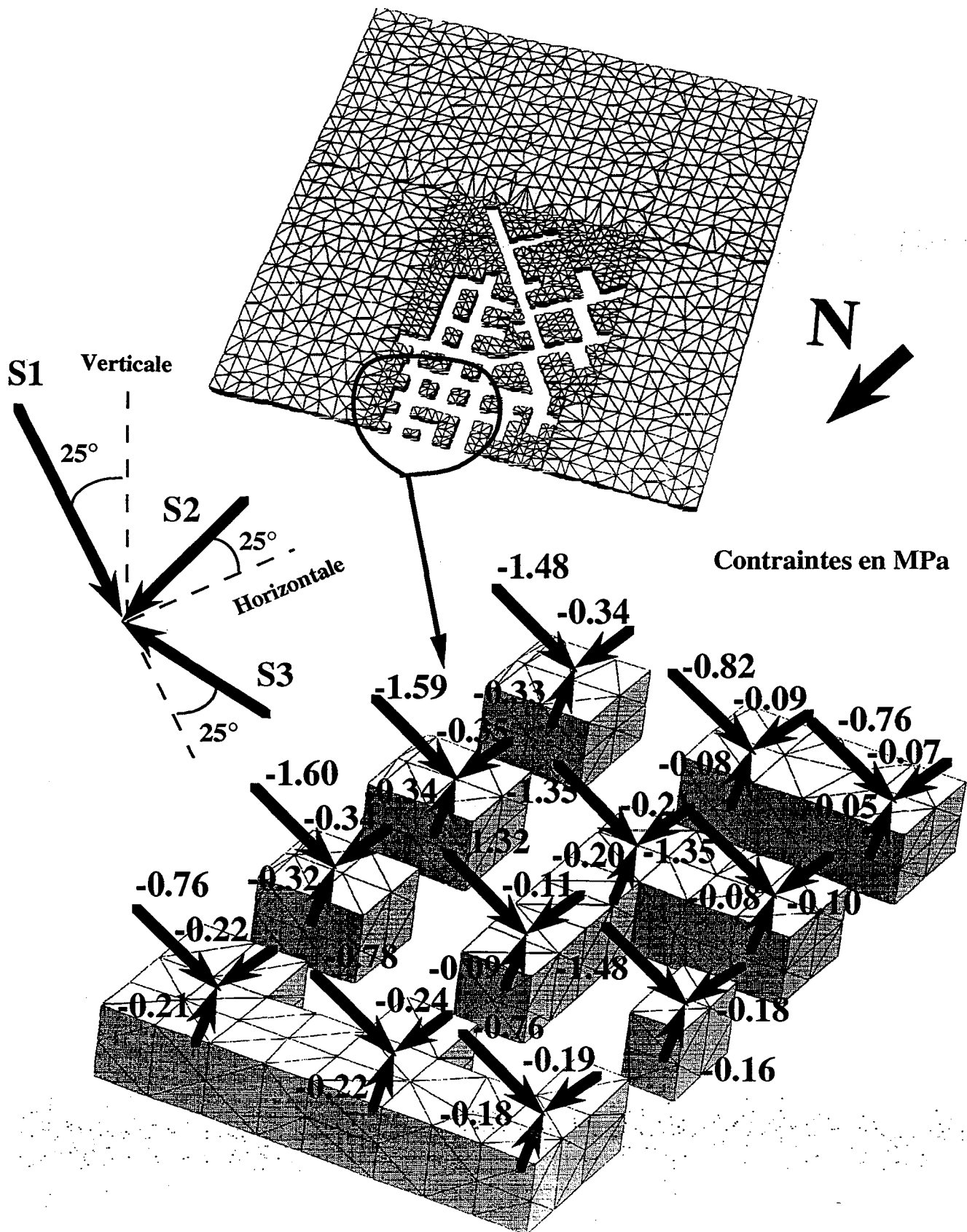


Figure III.45 : Tenseur moyen des contraintes principales dans la zone A
(modèle sans fractures mécaniques)

Compression négative

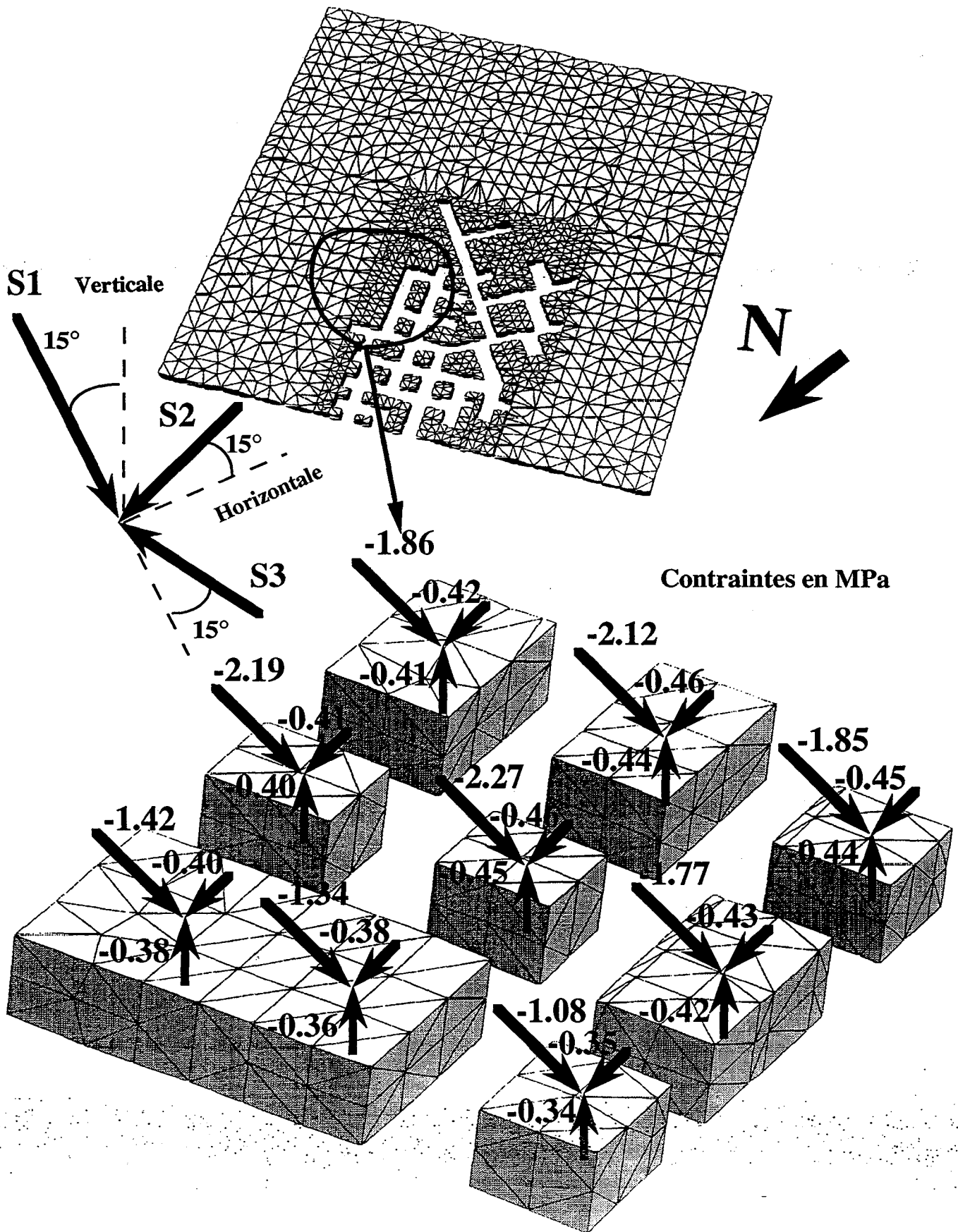


Figure III.46 : Tenseur moyen des contraintes principales dans la zone B (modèle sans fractures mécaniques)

Compression négative



Figure III.47 : Tenseur moyen des contraintes principales dans la zone C (modèle sans fractures mécaniques)

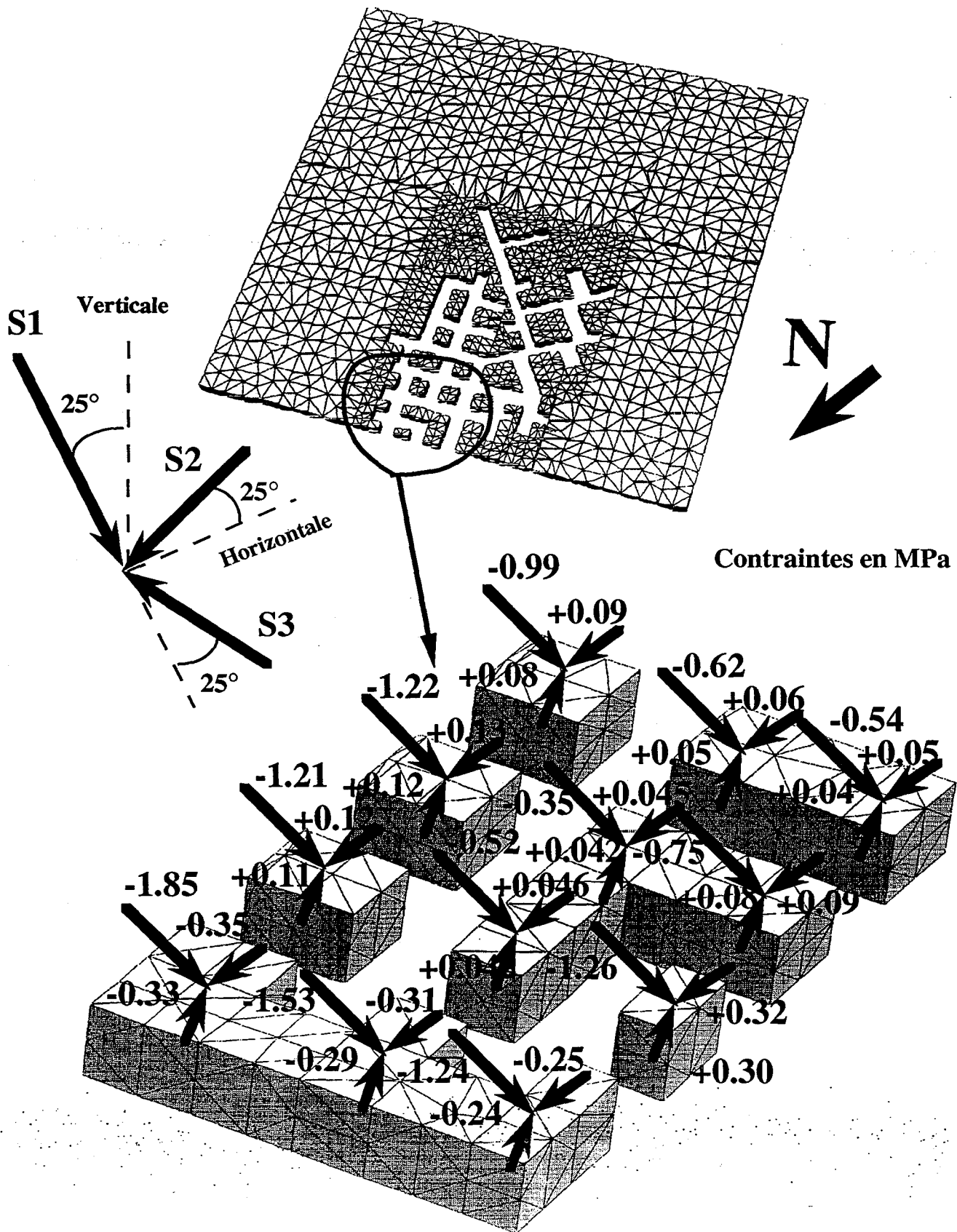


Figure III.48 : Tenseur moyen des contraintes principales dans la zone A (modèle avec fractures mécaniques)

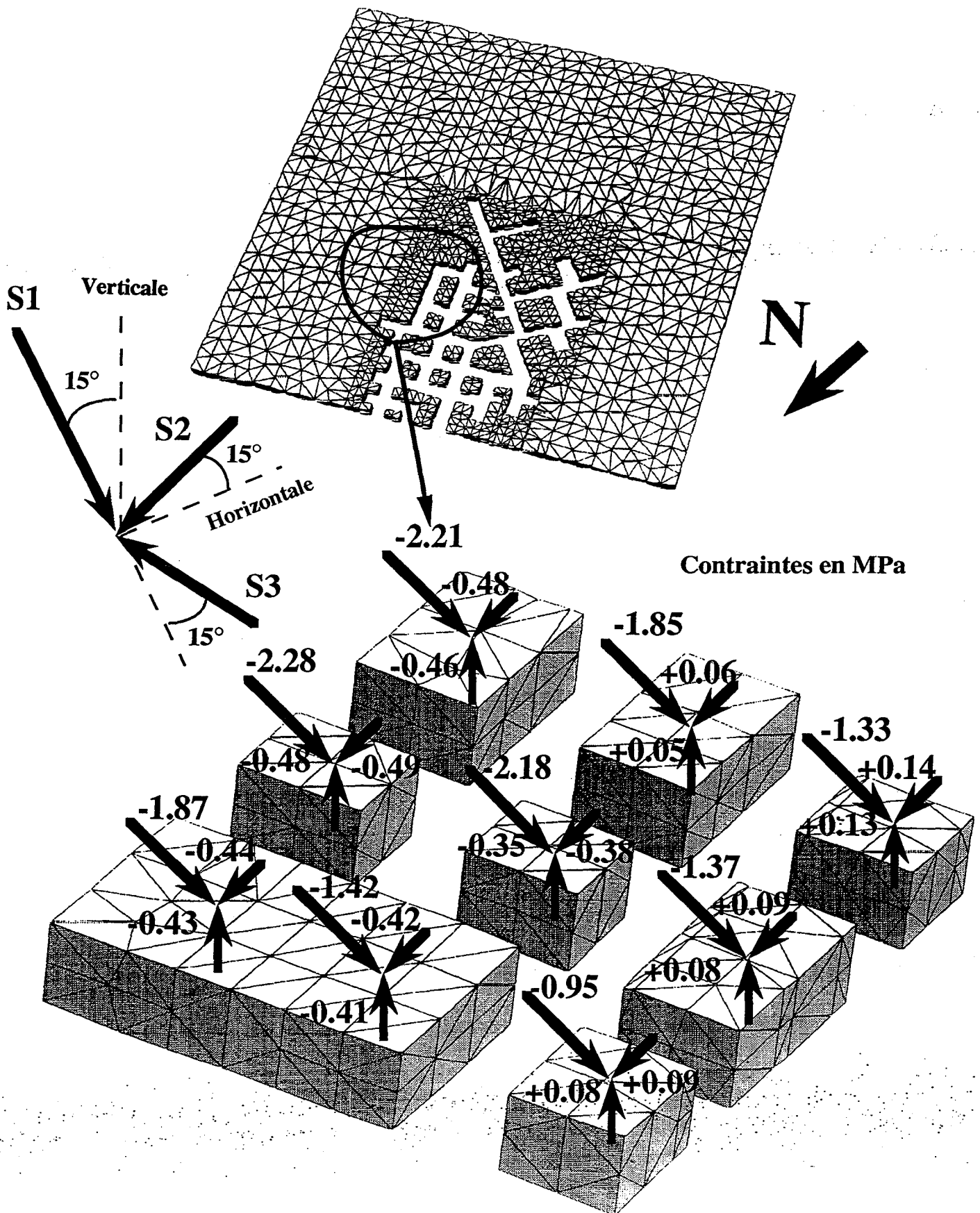


Figure III.49 : Tenseur moyen des contraintes principales dans la zone B (modèle avec fractures mécaniques)

Compression négative

Traction positive

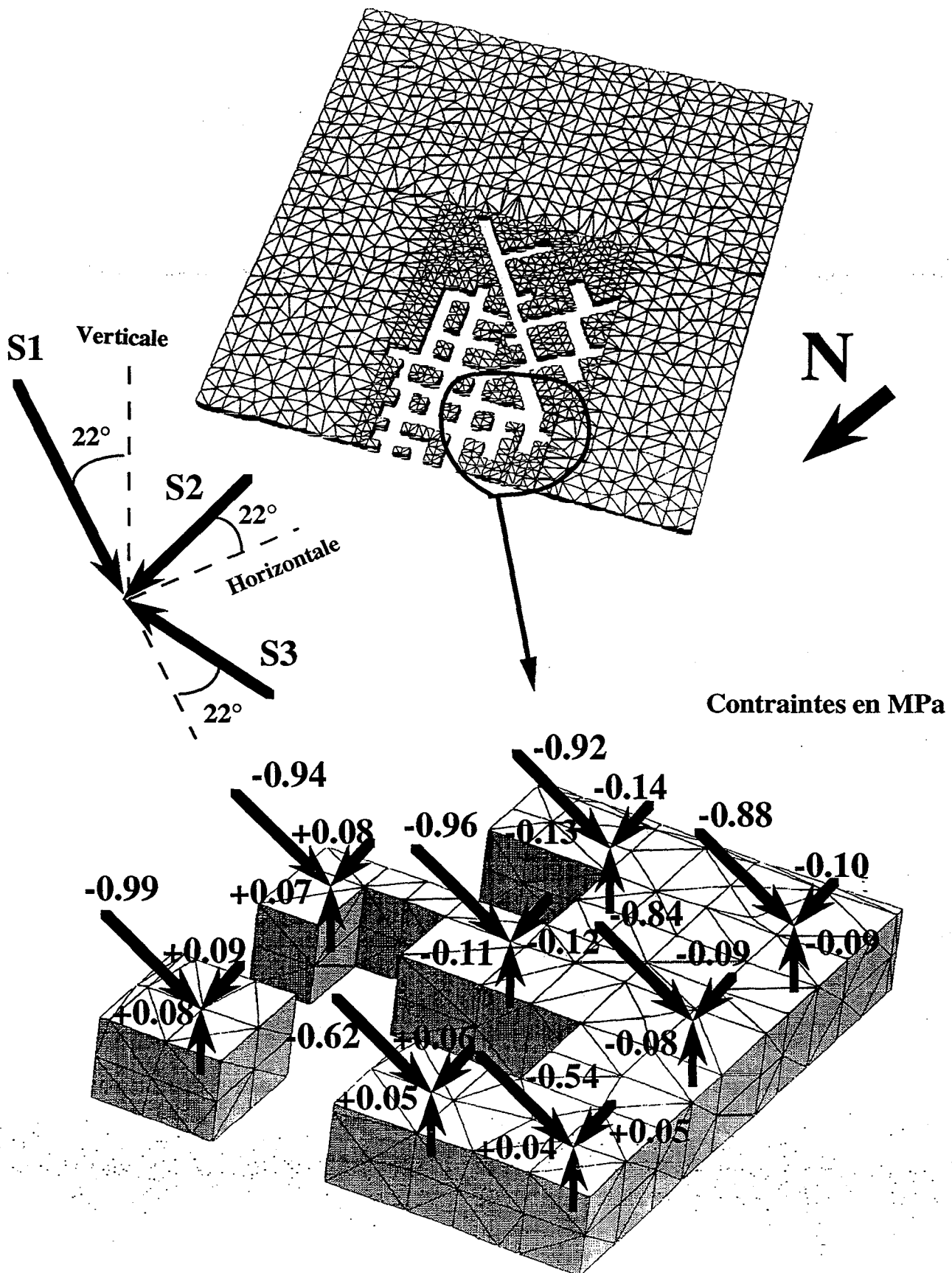


Figure III.50 : Tenseur moyen des contraintes principales dans la zone C (modèle avec fractures mécaniques)

- la contrainte verticale se rapproche de la contrainte verticale calculée en tenant compte du taux de défrètement par aire tribulaire,
- les contraintes intermédiaire et mineure sont plus faible que celles calculées par les modèles 2D (soumis à l'hypothèse de déformations planes).
- après fracturation mécanique, dans les piliers affectés des contraintes de traction se développent. La contrainte verticale en compression baisse, alors que les piliers voisins deviennent plus chargés (phénomène de "report de charge").

5.1.4. Comparaison des résultats

a) Comparaison des codes

Nous avons effectué une comparaison des résultats numériques des trois codes (CESAR-LCPC, UDEC et 3DEC) à chacune des différentes phases de calcul.

Les courbes présentées sur les figures III.51, ..., III.53 montrent l'évolution de déviateur⁽¹⁾ des contraintes en relation avec les phases de calculs et sur chaque pilier des deux coupes. C'est une valeur moyenne (même démarche que le tenseur moyen expliquée ci-haut) calculée sur l'ensemble des éléments formant les piliers dans chaque modèle.

La première phase représente la phase de consolidation (terrain sans flanc de coteau), la deuxième phase représente la formation du flanc de coteau, les autres phases concerne le creusement des galeries une à une dans un modèle en 2D. Dans 3DEC, les phases de creusement sont différentes puisqu'on simule le creusement zone par zone (figure III.44). La dernière phase dans les modèles discontinus simulent la fracturation mécanique observée dans les piliers.

Les deux modèles bidimensionnels donnent des résultats à peu près identiques. Les contraintes principales augmentent et se différencient de plus en plus en fonction des phases. La coupe B-B montre des valeurs plus importantes que la coupe A-A (1.12 MPa contre 0.95 MPa), en effet, le taux de défrètement au niveau de la coupe B-B est plus important.

Dans UDEC la phase finale donne un déviateur des contraintes plus élevé par la présence des fractures mécaniques. D'une manière générale les deux codes bidimensionnels convergent vers des valeurs de déviateur des contraintes qui ne dépassent pas 1.2 MPa en phase finale.

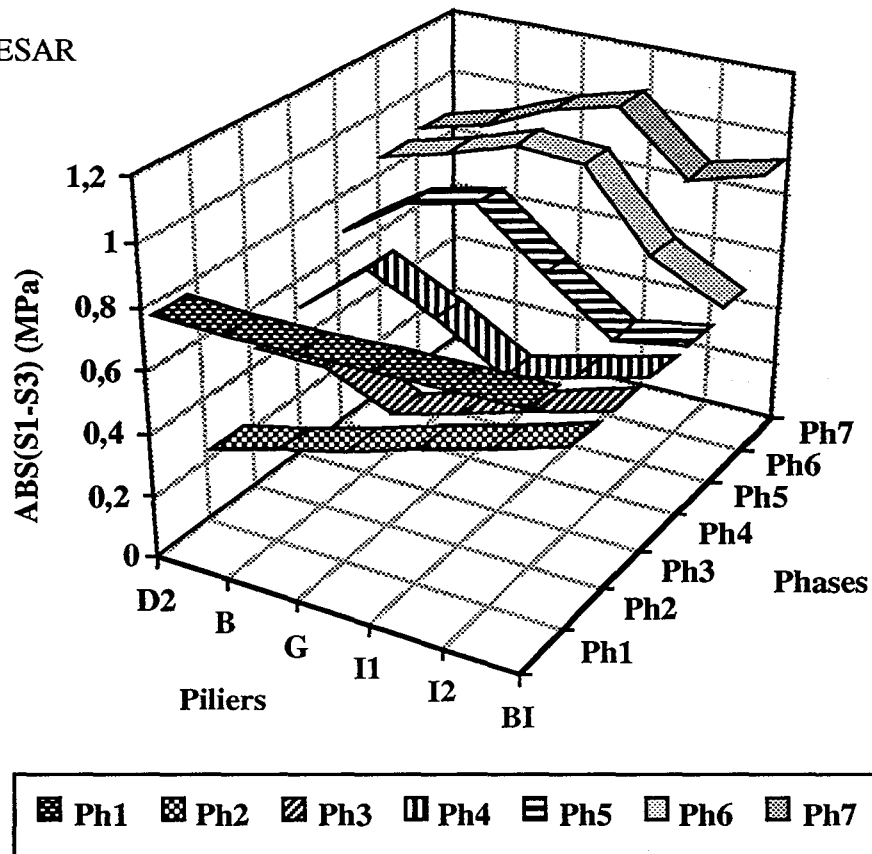
Dans le modèle 3DEC, la sollicitation des piliers dans la carrière est nettement supérieure aux résultats des deux derniers modèles à partir de la troisième phase. On observe une baisse de déviateur des contraintes dans le pilier D1 au cours de la phase de fracturation (Ph8). La fracture à cet endroit du pilier D a provoqué des contraintes de traction. D'une manière générale la phase de fracturation dans 3DEC a des conséquences plus importantes sur le déviateur des contraintes.

La comparaison des trois codes apporte trois points très intéressants :

- premièrement, l'allure des courbes 2D et 3D est légèrement différente, en effet en 2D la simulation par phases veut dire qu'on creuse une chambre à chaque fois, en revanche en 3D une phase veut dire qu'on creuse un ensemble des galeries,
- deuxièmement, la sollicitation des piliers fracturés dépend de la section du pilier,

(1) $(\sigma_1 - \sigma_3)$: déviateur des contraintes dans un calcul isotrope.

a : coupe A-A, CESAR



b : coupe B-B, CESAR

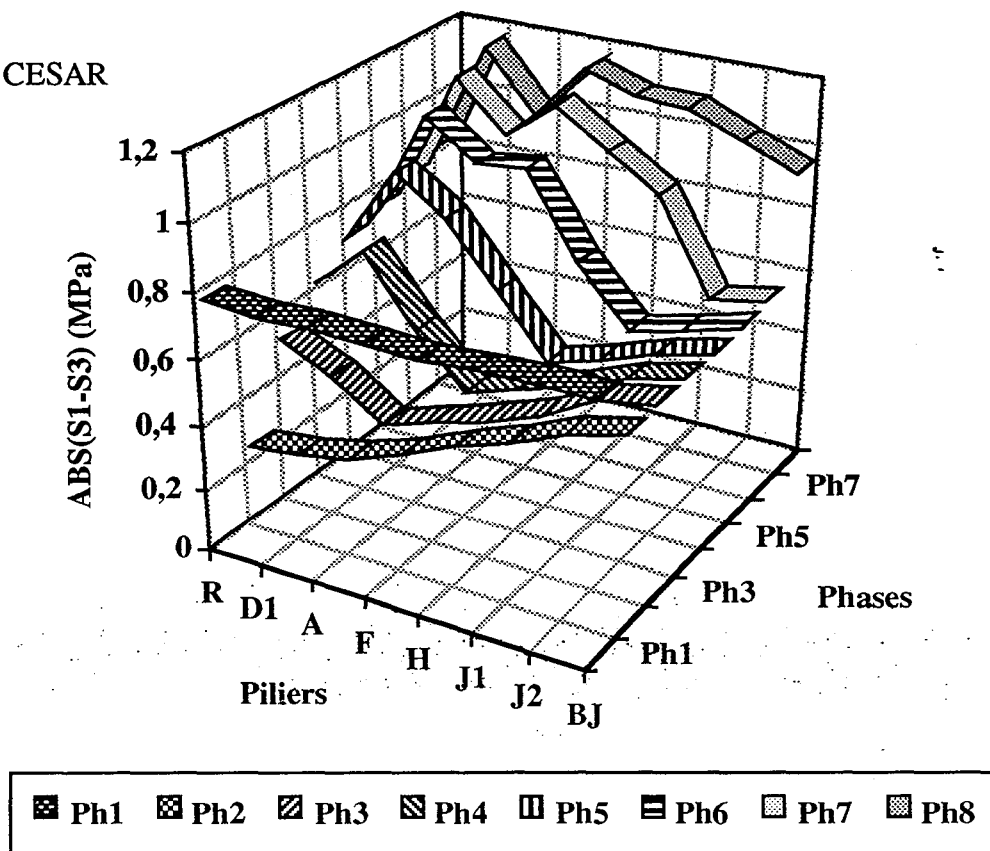
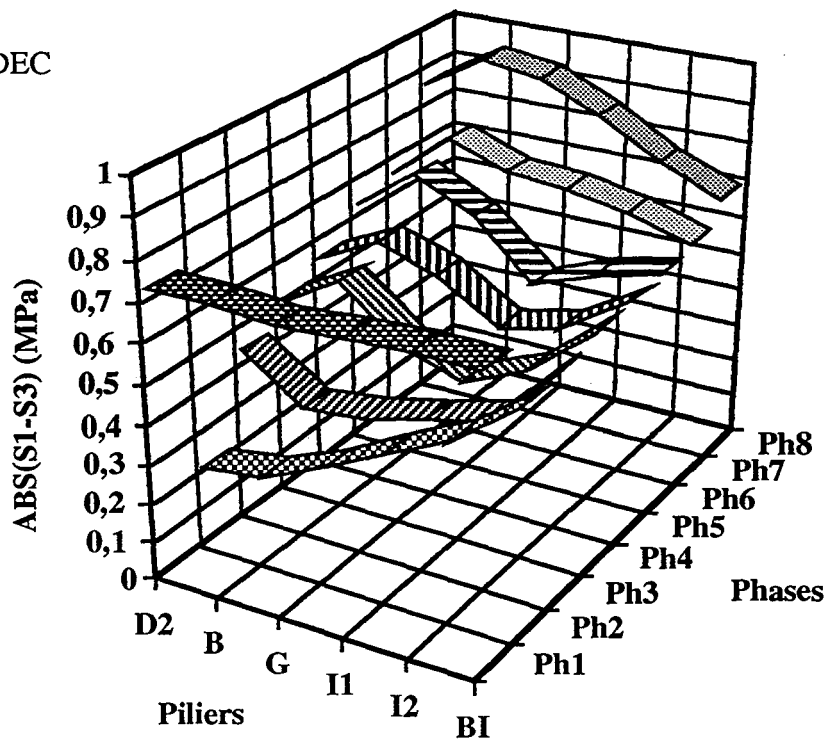


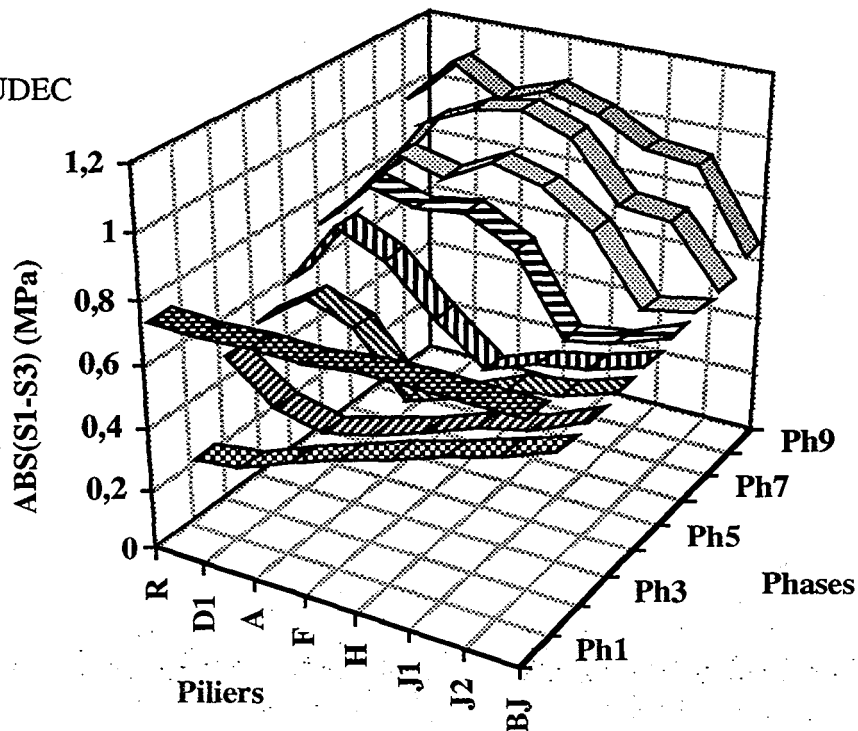
Figure III.51 : Evolution des contraintes déviatoriques dans les piliers

a : coupe A-A, UDEC



■ Ph1 ■ Ph2 ■ Ph3 ■ Ph4 ■ Ph5 ■ Ph6 ■ Ph7 ■ Ph8

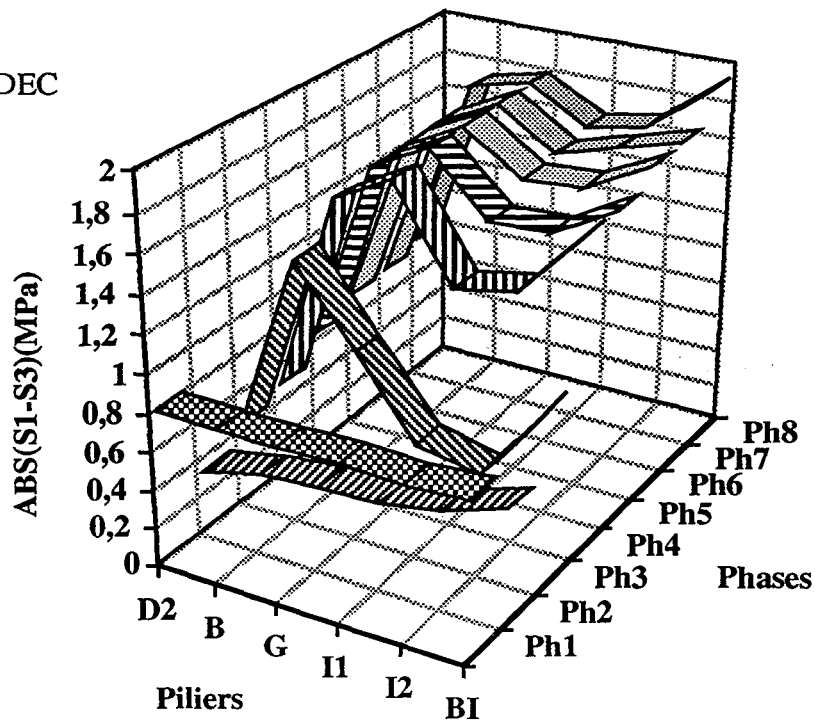
b : coupe B-B, UDEC



■ Ph1 ■ Ph2 ■ Ph3 ■ Ph4 ■ Ph5 ■ Ph6 ■ Ph7 ■ Ph8 ■ Ph9

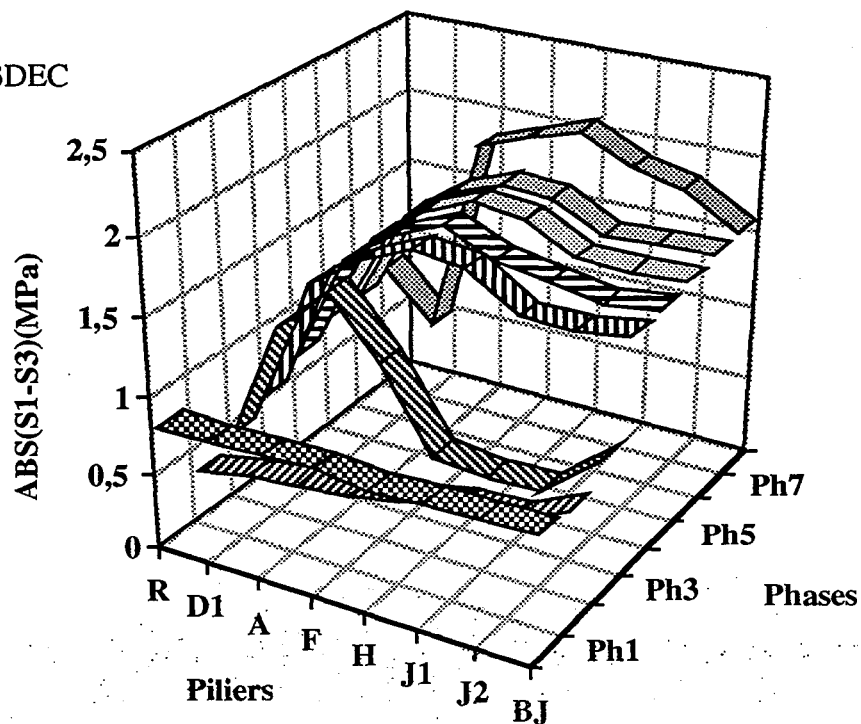
Figure III.52 : Evolution des contraintes déviatoriques dans les piliers

a : coupe A-A, 3DEC



■ Ph1 ■ Ph2 ■ Ph3 ■ Ph4 ■ Ph5 ■ Ph6 ■ Ph7 ■ Ph8

b : coupe B-B, 3DEC



■ Ph1 ■ Ph2 ■ Ph3 ■ Ph4 ■ Ph5 ■ Ph6 ■ Ph7 ■ Ph8

Figure III.53 : Evolution des contraintes déviatoriques dans les piliers

- troisièmement, le déviateur des contraintes est nettement supérieur dans le cas de 3D. Les contraintes principales intermédiaire et mineure sont beaucoup plus faibles par rapport à celles données par les modèles 2D. D'une manière quantitative, l'erreur de calcul entre les modèles 2D et 3D est de l'ordre de 65 à 70 % selon les coupes considérées avant fracturation et 80 à 95 % après fracturation.

La question qui se pose après cette comparaison des résultats de calcul 2D et 3D est la suivante : peut-on faire une modélisation 2D dans les exploitations par chambres et piliers si la géométrie est trop irrégulière ?.

Pour répondre à cette question, il faut tout d'abord bien comprendre les points suivants :

- à l'heure actuelle, et en particulier la situation des carrières souterraines est très compliquée si on poursuit le chemin du calcul tridimensionnel. Il faut savoir que la majorité des carrières (voir annexe 2) se caractérise par une forte dégradation (fracturation, effondrement, eau, etc...), de plus l'exploitation intensive fait que les ouvrages ont des formes très irrégulières. Par conséquent, il est beaucoup plus difficile de travailler en 3D,

- le calcul en 3D est très cher, il demande des grosses machines et beaucoup de temps pour la résolution du système matriciel,

- la seule difficulté à résoudre en 2D est comment tenir compte des vraies sections des piliers.

Suite à ces remarques, le modèle en 2D reste un outil de modélisation intéressant. Il convient mieux dans des configurations complexes (modélisation d'un effondrement par exemple). Le modèle en 3D est possible uniquement dans une zone particulière si la carrière est très grande.

le modèle en 3D s'impose dans des configurations simples (sans désordres). Dans ce cas, les deux modèles peuvent être comparés tout en indiquant l'erreur commise selon les cas (flanc de coteau, multi-niveaux etc...).

Dans toutes les configurations, nous pouvons procéder à un calcul en 2D suivi d'un autre en 3D afin d'écarter les problèmes de conditions aux limites. Cette idée n'est pas développée dans cette thèse mais pourra être un point intéressant dans les perspectives de la recherche.

D'une manière qualitative le calcul 2D et 3D donnent globalement à peu près les mêmes endroits du modèle les plus sollicités et par conséquent les modèles 2D restent toujours valables et intéressants dans le cadre des carrières souterraines exploitées par chambres et piliers abandonnés.

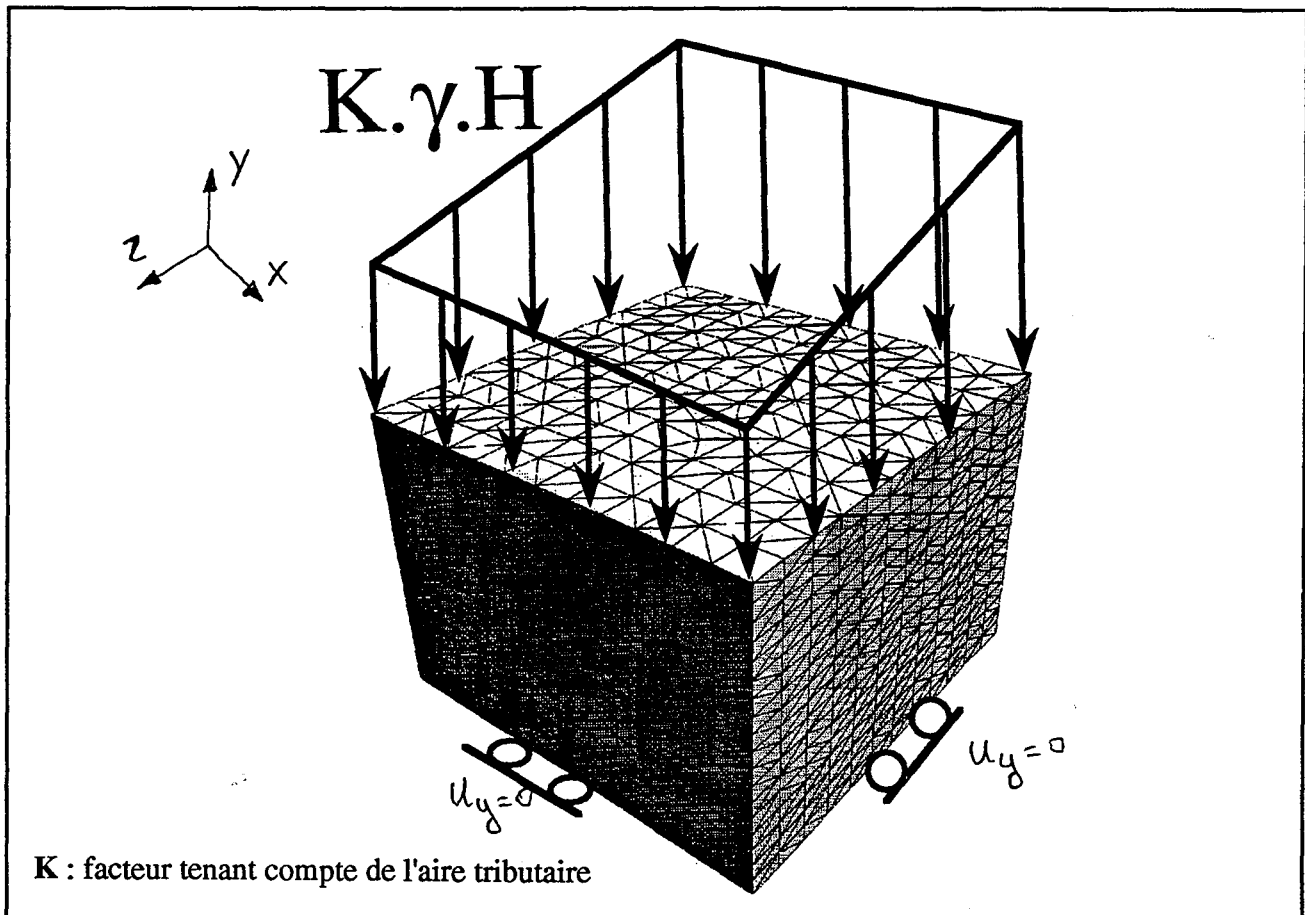
Nous allons dans ce qui suit focaliser le calcul 3DEC sur une zone particulière du grand modèle. Cette zone est bien le pilier H (figure III.1) où des mesures au vérin plat ont été entreprises. Ce calcul permet de mieux estimer les contraintes naturelles.

5.1.5. Pilier H : calcul par modèle

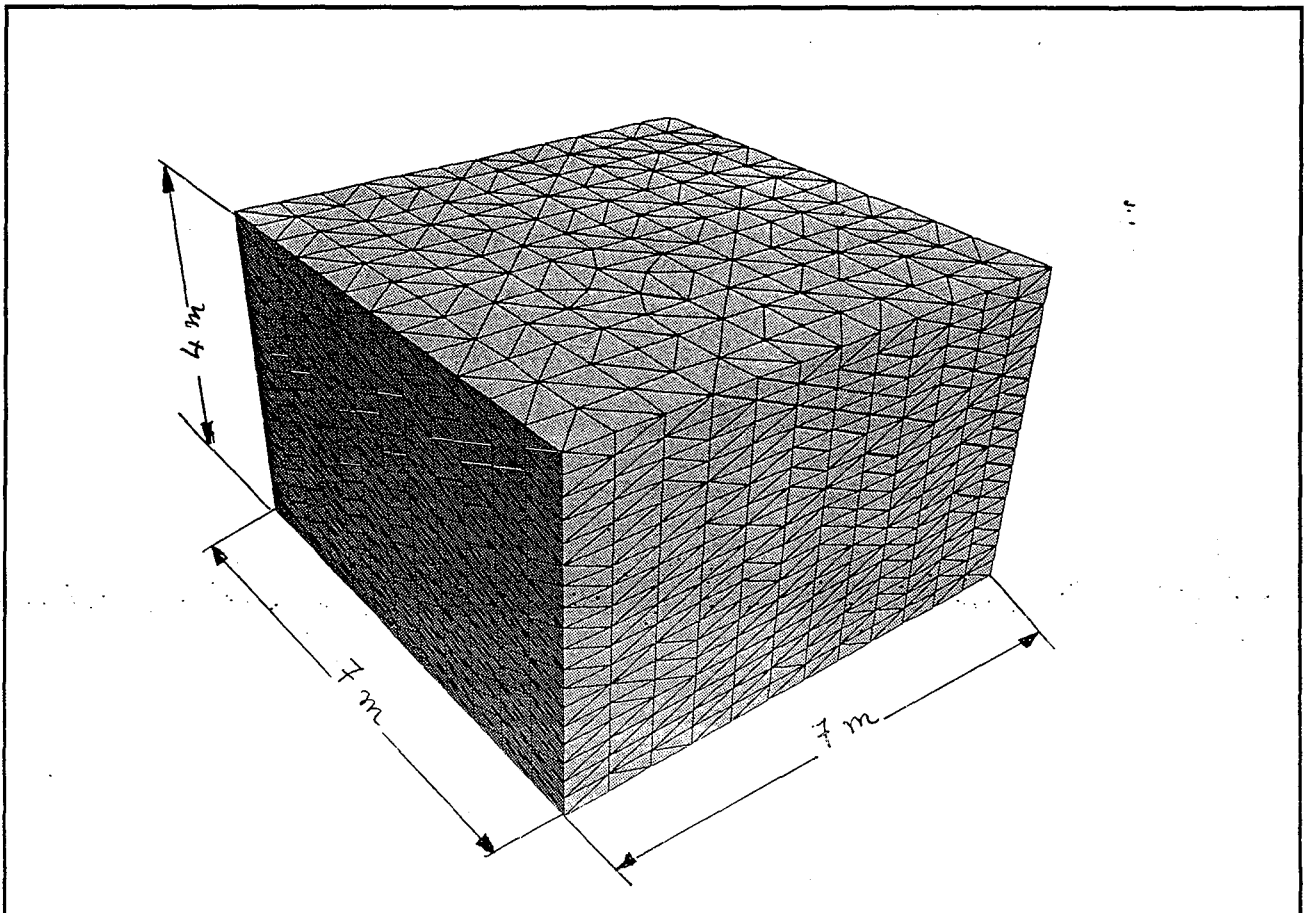
a) Le pilier H comme modèle

Nous avons choisi le pilier H pour un calcul local tridimensionnel en utilisant le code de calcul numérique 3DEC. Dans ce pilier, des essais au vérin plat ont été effectués par l'INERIS sur les quatre parois du pilier ainsi qu'au niveau du toit à proximité (TRITSCH J. J. et al., 1990 [118]).

Notre objectif est d'affiner les résultats du grand modèle présentés dans le cas d'une carrière sous un flanc de coteau avec un maillage beaucoup plus dense et de les comparer avec ceux des essais in situ au vérin plat.



a : Conditions aux limites du modèle.



b : Maillage adopté.

Figure III.54 : Conditions aux limites et maillage du modèle appliqué au pilier H.

Comme conditions aux limites, nous avons pris : les quatre parois du pilier sont libres, à la base nous avons supposé un déplacement vertical nul et au dessus un chargement gravitaire par la colonne tributaire (figure III.54).

Trois modèles ont été retenus après quelques étapes préliminaires de calcul de validation avec le grand modèle. Le premier compte 3654 éléments et 6228 noeuds, le deuxième est fait par 4562 éléments et 7815 noeuds et le dernier a 10141 éléments et 18367 noeuds (figure III.55).

b) Les principaux résultats

Malgré les conditions aux limites du modèle local qui sont simples (sans tenir compte de l'effet de vides et des piliers voisins), nous avons pu réussir à retrouver à peu près le même tenseur des contraintes principales moyen.

Les figures III.55 illustre les valeurs moyennes des contraintes principales et les angles dans le repère général en haut du pilier. La contrainte principale majeure fait avec la verticale un angle moyen de l'ordre de 15° et a une valeur oscillant entre 2.0 MPa et 2.4 MPa en compression.

Les contraintes principales intermédiaire et mineure ont le même ordre de grandeur et varient de 0.4 MPa à 0.5 MPa en compression.

En adoptant un maillage plus dense, le calcul donne 3 % à 5 % de gain sur les valeurs de contraintes principales issues du premier calcul. Les valeurs des angles restent sans changement.

Les essais in situ au vérin plat ont été effectués à mi-hauteur du pilier H par des saignées verticales et horizontales. Un seul essai a été fait au toit à 45° (TRITSCH J. J. et al., 1990 [118]).

A mi-hauteur et dans le cas des saignées horizontales, on note deux valeurs Nord pilier H (1.03 MPa) et Sud pilier H (0.9 MPa) (tableau III.3).

Les saignées verticales donnent 0.33 MPa Nord pilier H et 0.68 MPa Est pilier H. Au toit à 45° , nous avons enregistré 2.40 MPa (TRITSCH J. J. et al., 1990 [118]). Si nous faisons une comparaison de ces résultats avec ceux issus du calcul par modèle, nous constatons que l'écart est de l'ordre de 0.2 MPa à 0.3 MPa.

c) conclusion

Ce calcul à petite échelle dans le cas d'un modèle discontinu, ne dépend pas du grand modèle (calcul précédent). Nous avons pris le pilier H sans tenir compte de l'interaction des autres piliers. Malgré cet inconvénient les résultats sont comparables à ceux issus du grand modèle.

Dans un modèle tridimensionnel et si on modélise à grande échelle, la précision de calcul des contraintes demande une forte densité de maillage. Cette opération n'est pas toujours réalisable même si on travaille sur des grosses machines. Pour résoudre cette difficulté, nous suggérons de généraliser l'idée du modèle à petite échelle "LOUPE" dans les codes en 3D (3DEC par exemple).

Ces résultats par modèles sur le pilier H sont intéressants car ils permettent de mieux préciser la sollicitation de l'ouvrage en question. Pour une meilleure validation, il est indispensable de multiplier les essais in situ, en utilisant des méthodes différentes (surcarottage par exemple). Les essais devront être effectués sur la totalité des zones d'un pilier donné.

Le choix du lieu de mesure dans un ouvrage (pilier, toit et planche entre niveaux) pourrait être déterminé par le modélisateur après avoir mis au point un calcul numérique global et local dans la zone de mesure.

Contraintes principales en MPa

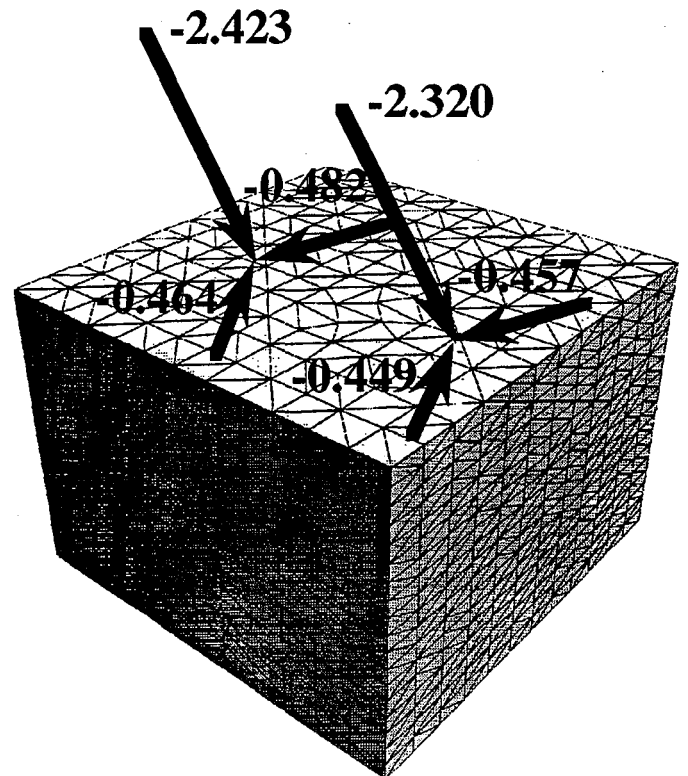
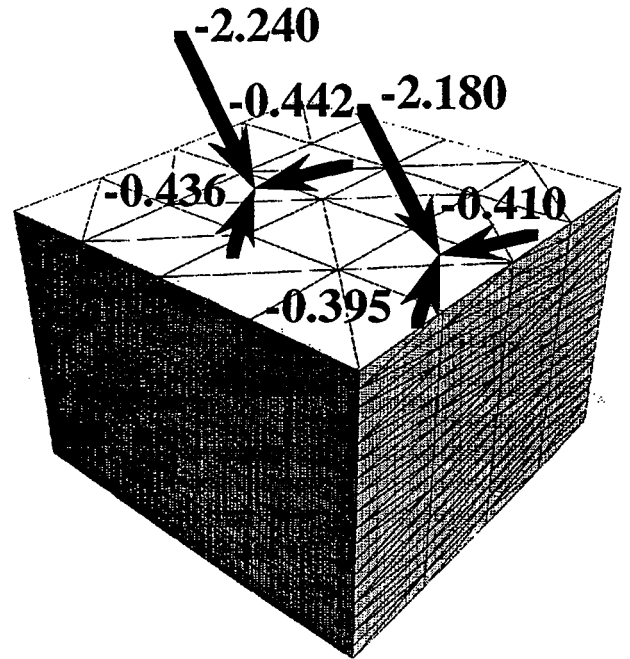
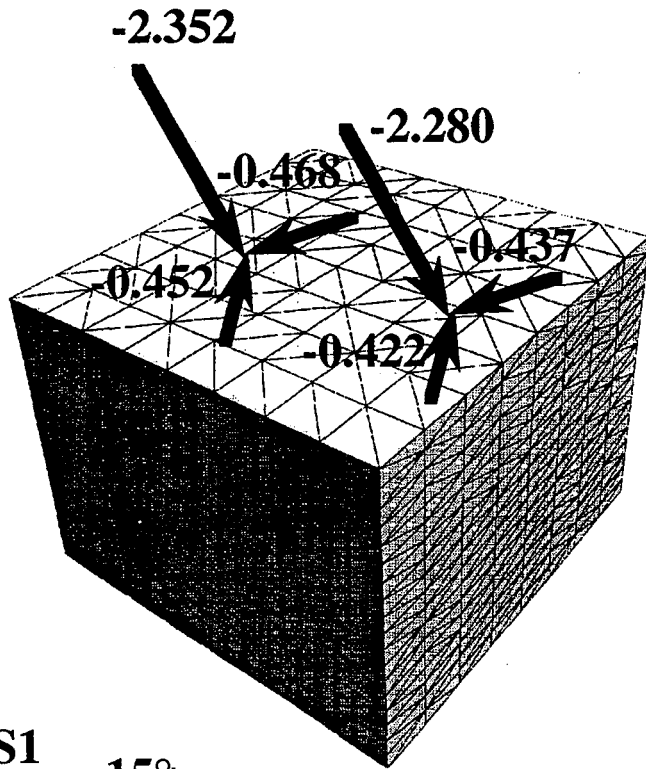
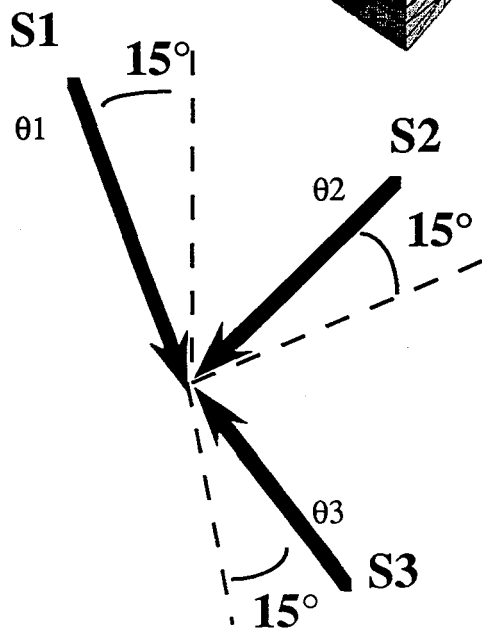


Figure III.55 : Tenseur moyen des contraintes principales selon la densité du maillage en haut du pilier H

5.2. Cas d'une carrière souterraine multi-niveaux

5.2.1. Introduction

La capacité des logiciels et celle des ordinateurs ne permettent pas de modéliser une grande carrière souterraine. Pour cette raison, nous avons pensé au choix d'une zone d'intérêt qui peut apporter des éléments supplémentaires en ce qui concerne les instabilités locales observées à l'intérieur de la carrière.

Nous avons utilisé un code de calcul basé sur la méthode de l'équilibre limite (RESOBLOK).

Nous avons choisi une zone proche de l'effondrement pour les raisons suivantes :

- les fractures mécaniques à cet endroit sont nombreuses (figure III.23 et III.24), ce qui veut dire la possibilité de déclencher une nouvelle rupture en chaîne à proximité d'un effondrement préexistant,
- l'observation des chutes des blocs plus particulièrement au voisinage des effondrements est un témoin d'une zone à risque.

5.2.2. Calcul RESOBLOK

a) Présentation du modèle

Nous avons choisi notre modèle à proximité de l'effondrement central dans le niveau supérieur pour les raisons citées plus haut. Dans ce modèle nous tenons compte de toute forme de fracturations :

- les discontinuités stratigraphiques horizontales,
- la fracturation naturelle et induite présentée plus haut,

Le code RESOBLOK permet de tenir compte de l'espacement, orientation et pendage des fractures soit d'une manière aléatoire soit d'une manière déterministe.

Le modèle comprend huit piliers, aucune fractures dans les piliers en raison de la capacité du logiciel. Le nombre maximal des blocs dans une simulation est limité à 2000 blocs. Pour la même raison, nous n'avons pris que 10 m de terrains au dessus des piliers, ce choix est légitime puisque la fracturation est plutôt observée au toit du niveau supérieur et en plus les chutes de blocs concerne en premier lieu les premiers mètres du toit immédiat et du haut toit (figure III.56).

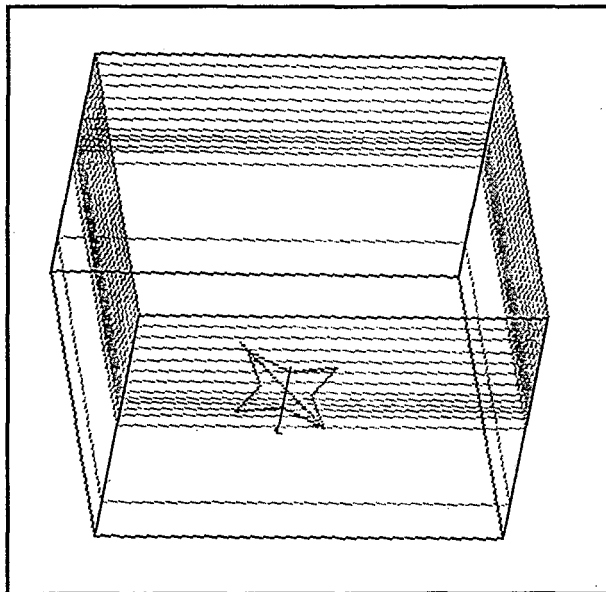
Une étude paramétrique a été faite concernant trois facteurs essentiels pour la stabilité :

- la puissance de la première couche au toit,
- la cohésion des fractures (0.02 MPa à 0.06 MPa),
- l'angle de frottement des fractures (0° à 40°).

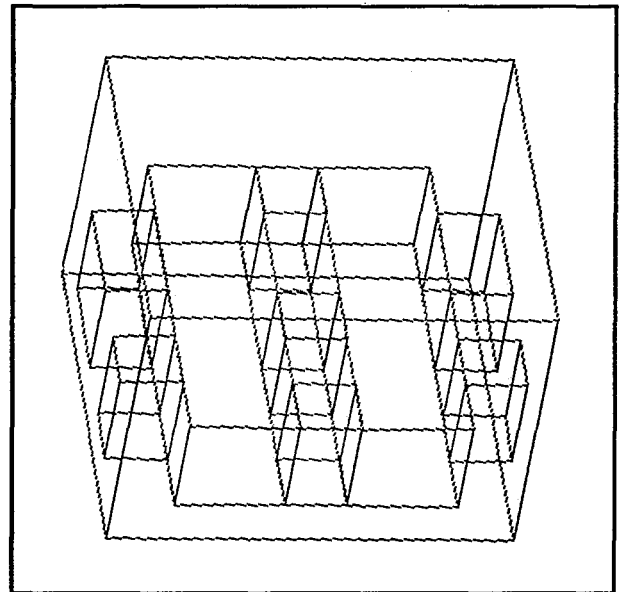
b) Résultats du calcul

La figure III.56 montre les différentes phases de calcul, en commençant par l'introduction des couches au toit, l'excavation des galeries, la génération des fractures d'une manière aléatoire et enfin la localisation des blocs instables dans le modèle.

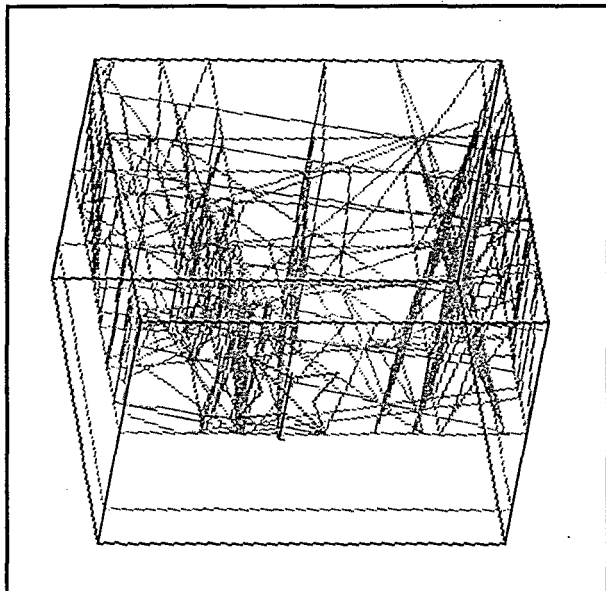
Partie III - COMMENT MODELISER DES CARRIERES COMPLEXES ?



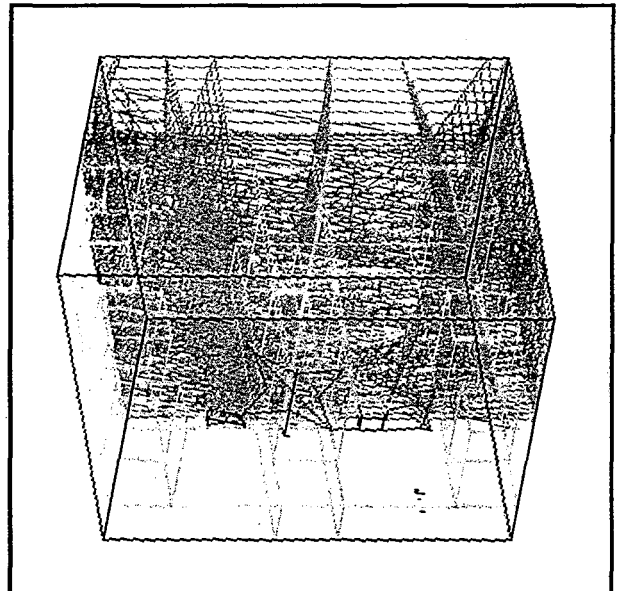
a : Simulation des couches



b : Les excavations

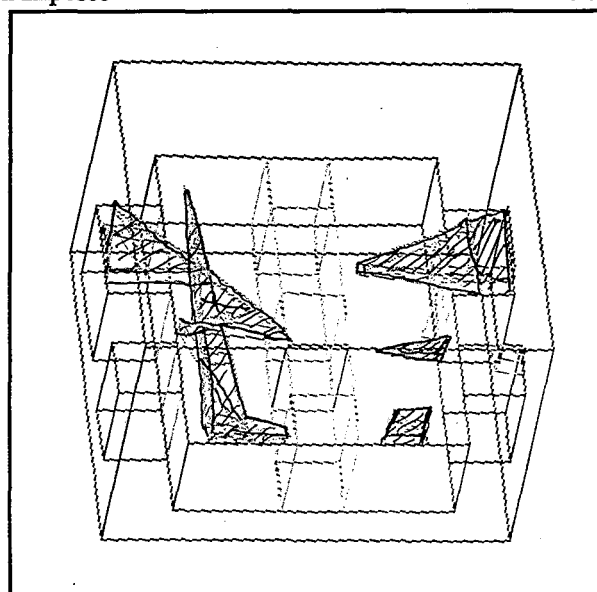


c : La fracturation imposée



d : Toute la fracturation

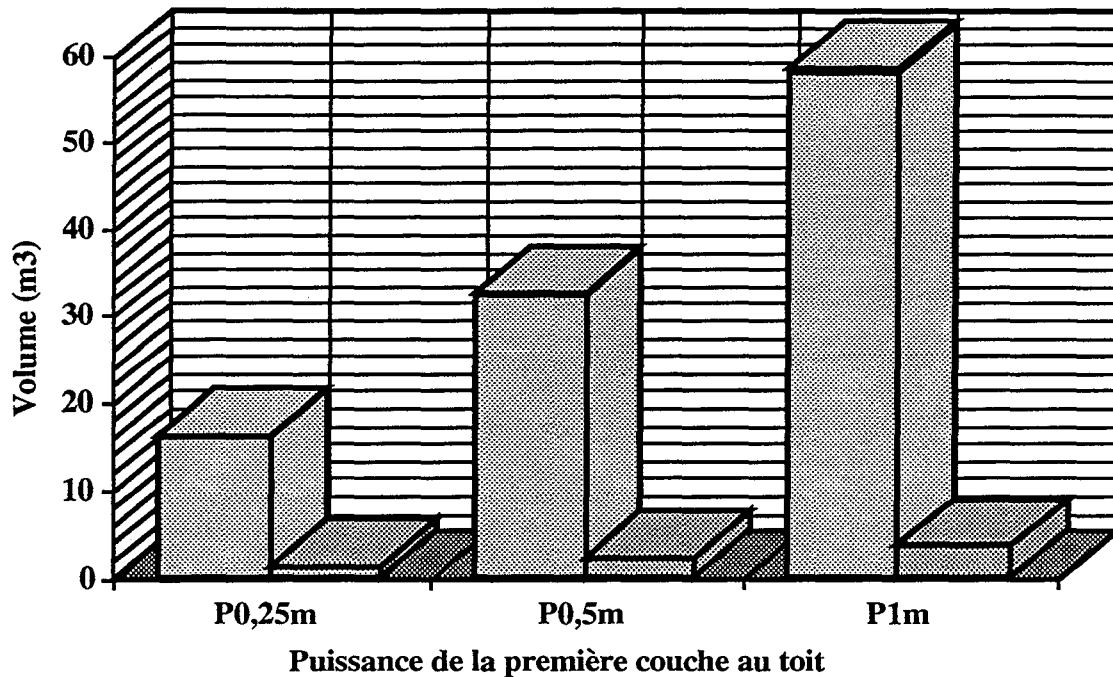

 SCALE = 4 units



e : Visualisation des blocs instables

Figure III.56 : Les étapes suivies dans le calcul par RESOBLOK.

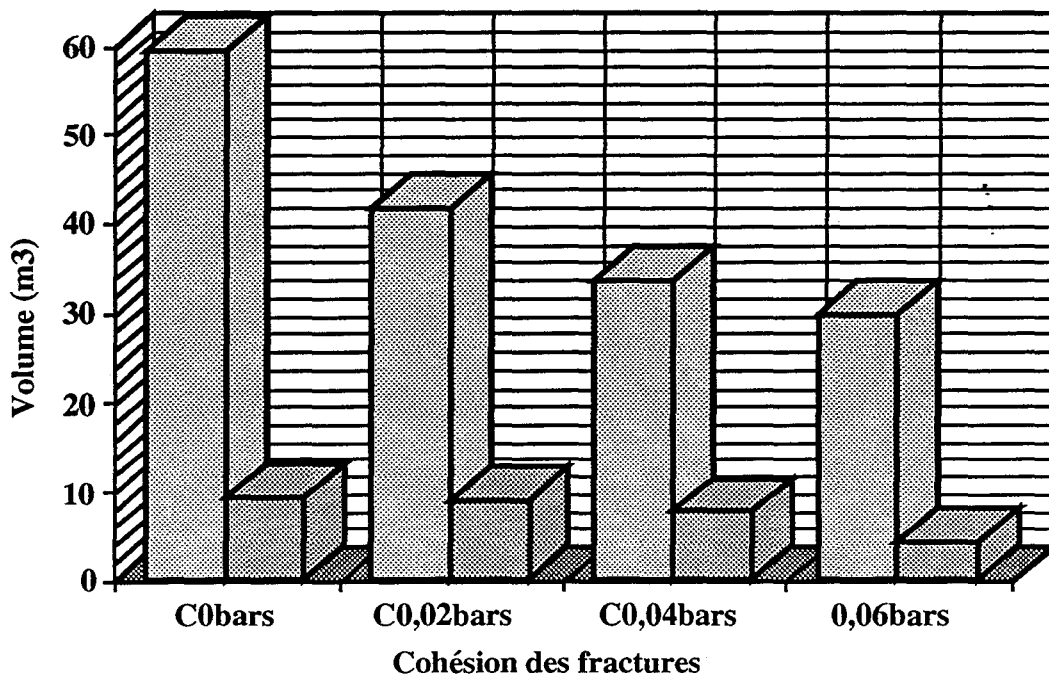
a : variation en fonction de la puissance de la 1ère couche au toit



■ Volume total des blocs instables (m³)

■ Volume moyen des blocs instables

b : variation en fonction de la cohésion des fractures



■ Volume total de blocs instables

■ Volume moyen de blocs instables

Figure III.57 : Variation de volume de blocs instables en fonction de la puissance de la 1ère couche au toit et la cohésion des fractures

Dans tous les cas, nous constatons des chutes de blocs au toit des galeries, la phase finale les confirme (figure III.56e). La totalité des blocs instables se localisent au milieu des galeries les plus larges (7 m). La chute d'un bloc provoque un déséquilibre dans les blocs voisins qui tombent à leur tour et ainsi de suite.

L'étude paramétrique a montré l'importance de la puissance de la couche au toit d'une part et la cohésion des fractures d'autre part.

Le volume total des blocs instables augmente si la puissance de la couche au toit augmente aussi (figure III.57a). Ce résultat est tout à fait logique puisque les blocs deviennent plus gros.

Une cohésion de 0.06 MPa permet d'éviter à peu près 50 % de chutes des blocs par rapport à des fractures sans cohésion (figure III.57b).

La variation de l'angle de frottement des fractures n'influe pas le nombre des blocs instables. Toutes les fractures sont subverticales, l'angle de frottement n'a aucun effet sur le mouvement des blocs.

c) Conclusion

Malgré les simplifications et les hypothèses dans le calcul, ce modèle à petite échelle apporte des éléments supplémentaires à notre analyse et en particulier la confirmation des instabilités locales par des chutes de blocs au toit des galeries.

Les blocs tombants dépendent de la puissance de la première couche du toit et de l'ouverture des fractures (fractures sans cohésion).

5.3. Conclusion

En ce qui concerne les carrières souterraines complexes, ces deux outils de modélisation sont très utiles. Nous pouvons les appliquer en même temps dans d'une carrière donnée (comme le cas de notre démarche), c'est-à-dire, évaluation de la stabilité globale des ouvrages sous l'effet de la fracturation et estimation de degré de sollicitation des ouvrages en comparaison avec des mesures in situ.

Le choix de telle ou telle méthode de calcul dépend de la complexité des carrières. Nous cherchons toujours à transformer un problème complexe en un problème simple. Un modélisateur doit bien comprendre le problème posé pour décider comment et avec quoi on doit le modéliser.

Pour mieux estimer les contraintes naturelles dans le massif rocheux en présence des cavités souterraines, le modèle tridimensionnel est utile malgré la difficulté de mise en oeuvre du calcul. Compte tenu de la mauvaise géométrie des carrières, un modèle en 3D nécessite une simplification du problème : la forme des piliers, la présence des discontinuités dans le recouvrement et les conditions aux limites.

En liaison avec la complexité des carrières, nous pouvons dire qu'il est nécessaire de suivre une méthode de calcul étape par étape, c'est-à-dire, choix d'un modèle de base, excavation des galeries, introduire les discontinuités dans le modèle, introduire une nappe d'eau etc....

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Base de données carrières

Pour répondre aux problèmes de complexité dans les carrières souterraines, nous avons suivi une méthode simple et efficace. Il s'agit tout d'abord de connaître ces carrières en effectuant une base de données où nous avons regroupé des caractéristiques mécaniques, géométriques, de dégradation et des facteurs de complexité.

En se basant sur ces données réelles, nous avons procédé à un traitement statistique pour pouvoir dégager les principales raisons de complexité en mettant en jeu toutes les variables.

L'analyse en composantes principales a mis en évidence deux points essentiels :

- un premier axe principal nous informe sur les règles de l'art c'est-à-dire dans le cas où on exploite à une profondeur peu importante, les carrières sont plutôt stables, en effet la roche exploitée a une forte résistance et les piliers sont bien dimensionnés.

- un deuxième axe principal nous montre la complexité des carrières c'est-à-dire une combinaison entre les facteurs internes (forte dispersion des sections des piliers, la fracturation induite et les effondrements) et les facteurs externes tels que le problème d'eau, les charges statiques et dynamiques et les phénomènes karstiques, rend une carrière souterraine complexe.

L'analyse factorielle discriminante a permis de discriminer l'ensemble des carrières selon l'état des piliers. Nous constatons suite à cette analyse que la plupart des carrières de la région parisienne se caractérisent par un pourcentage élevé des piliers sains alors que les carrières des trois autres régions (Gironde, Nord et Maine-et-Loire) ont un pourcentage élevé des piliers très fracturés. En effet, c'est dans ces régions qu'on observe les phénomènes karstiques, les venues d'eaux et la manque de reconnaissance des vides principaux facteurs de dégradation.

Cette partie statistique de notre thèse dégage les principaux problèmes à résoudre par des modèles numériques ultérieurement.

Plusieurs questions ont été posées à la modélisation pour évaluer d'une manière globale ou locale les sollicitations des ouvrages souterrains dans les carrières complexes. Elle a répondu selon la séquence suivante :

Modélisation à grande échelle

Dans le cas d'une exploitation sous un flanc de coteau, nous avons effectué un calcul visant essentiellement la compréhension de l'état de contraintes dites "initiales". Nous avons retenu que la déviation du tenseur des contraintes principales par rapport à la verticale sous la pente peut atteindre 40°. De plus, cette configuration à la surface (flanc de coteau) engendre des contraintes de cisaillement non négligeables dans le terrain.

La prise en compte du phasage des travaux dans le cas d'une carrière sous un flanc de coteau ou une falaise a mis en évidence les zones les plus sollicitées du modèle et qui sont proches de la vraie sollicitation dans le terrain :

- l'exploitation du flanc de coteau vers le fond de la carrière engendre des fortes contraintes dans les piliers et notamment dans ceux au voisinage de l'entrée. Les points plastiques lors de la dernière phase d'exploitation indiquent les endroits les plus sollicités de ces piliers et qui sont bien ceux qui ont subi une fracturation mécanique.

CONCLUSION GENERALE

- la reprise des travaux au mur d'une carrière sous une falaise peut provoquer des instabilités au fond comme au voisinage de la falaise par le surchargement des piliers.

Dans le cas d'une exploitation multiniveaux et en tenant compte aussi du phasage des travaux, nous avons pu comprendre des phénomènes affectant globalement certains secteurs ou parties importantes de la carrière et des phénomènes particuliers, à l'échelle d'un pilier :

- des sollicitations plastiques de plus en plus importantes en fonction de l'augmentation de la hauteur de recouvrement au sein des piliers et dans la planche intercalaire. Ce phénomène peut être localement accentué par une mauvaise superposition des piliers, ou un amincissement de la planche intercalaire.

- dans le cas où un petit pilier supporte un grand pilier sus-jacent, on peut observer une surcharge du petit pilier sous-jacent qui se traduit par une forte contrainte verticale. Au sein de la planche entre les deux piliers un fort cisaillement se développent.

- certains phénomènes de détente sont parfois observés au toit des chambres. Dans la plupart des cas cette détente se traduit par une modification de l'état des contraintes et une augmentation des tractions et cisaillement, en particulier dans les planches intercalaires.

- dans des endroits où la hauteur de recouvrement est très faible (ancienne excavation à ciel ouvert) et lorsqu'on atteint une portée critique d'une chambre, les zones en traction se développent au toit en aboutissant à une rupture progressive donnant naissance à un fontis.

- dans les zones les plus défruitées, les piliers deviennent de plus en plus chargés, des fractures mécaniques se développent et finissent par un écrasement total. La rupture se fait soit progressivement piliers par piliers, soit affectant au même temps l'ensemble des piliers en donnant un effondrement généralisé.

La prise en compte des discontinuités dans le modèle numérique (UDEEC) a mis en évidence une sollicitation plus réaliste des piliers fracturés dans le cas d'une carrière sous un flanc de coteau. Dans le cas d'une carrière multiniveaux, les fractures naturelles et induites influent énormément sur la stabilité des ouvrages souterrains. Ces fractures accélèrent en quelque sorte la rupture du toit et les piliers.

Dans un modèle 3D (3DEC), la prise en compte des fractures mécaniques au sein des piliers fait apparaître des contraintes de traction et les contraintes verticales sur ces piliers en compression baissent, alors que les piliers voisins deviennent plus chargés. En tenant compte des discontinuités le modèle 3D (RESOBLOK) appliqué à une zone particulière dans la carrière a permis d'apporter des éléments de réponse supplémentaires dans notre analyse. Il permet de localiser les instabilités locales dans la zone (chutes de blocs). Les blocs instables dépendent de la puissance de la première couche au toit et de l'ouverture des fractures naturelles et/ou induites.

Le calcul 3D estime mieux les contraintes naturelles en comparaison avec les codes en 2D. Au sein des piliers, une déviation des contraintes principales par rapport à la verticale est observée. Avant fracturation mécanique, les piliers proches de l'entrée de la carrière subissent une forte sollicitation.

Enfin, et dans le cas d'une carrière multiniveaux, un effondrement a été simulé. Les résultats de la modélisation montrent l'effet néfaste de ce dernier sur les piliers voisins au niveau supérieur et au niveau inférieur. La planche intercalaire devient fortement sollicitée et notamment en dessous de l'effondrement. Cette sollicitation dépend essentiellement de la densité de fracturation dans la zone effondrée.

Modélisation à petite échelle

La focalisation du calcul sur une zone précise d'un grand modèle permet de tenir compte des couches très minces et de mieux estimer le tenseur des contraintes. En ce sens, nous avons développé un programme dit "LOUPE" qui sert à améliorer les résultats du calcul par éléments finis dans le code CESAR-LCPC. Les premiers résultats sont très proches de ceux donnés par le grand modèle.

Des améliorations futures pourront être utiles afin de rendre ce programme utilisable telles que :

- tenir compte des critères de comportement élastoplastiques qui existent déjà dans le code CESAR-LCPC,
- introduire le menu modèle "LOUPE" dans le code CESAR-LCPC.

Autour du problème de validation

Le problème de validation reste à l'heure actuelle le problème essentiel de la recherche en géotechnique et tout particulièrement dans les ouvrages souterrains (carrières souterraines, mines, tunnels, etc...).

Par manque des mesures in situ, la validation des résultats des modèles numériques n'est pas encore résolue. Ces modèles peuvent être intéressants dans la mesure où d'autres travaux de mesures auront lieu. Malgré cet manque de validation, qualitativement, la modélisation est un bon moyen d'étudier la stabilité des carrières souterraines.

Les perspectives

La base de données carrières et l'analyse statistique ont permis de dégager les principaux problèmes de complexité. Nous avons sélectionné un certain nombre de cas dans les principales régions concernées en France. Pour tenir compte de toutes les carrières complexes, une étude complète sera utile en regroupant les carrières selon la nature de la roche exploitée afin d'aboutir à la notion "bassin de risques".

Compte tenu de la diversité des modèles numériques, il est intéressant de procéder à des essais de caractérisation en tenant compte de l'aspect dégradation (eau, fracturation, temps et vieillissement).

Dans le cas de la présence d'une nappe souterraine au dessus de la carrière ou en dessous, un couplage hydromécanique d'un calcul numérique est indispensable pour mieux estimer la sollicitation des ouvrages souterrains.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
CARRIERES SOUTERRAINES

[1] ALLARD J. F., 1975

Méthode adoptée dans le Sud-Ouest de la France pour l'étude de la stabilité des carrières souterraines. Thèse Doctorat es Sciences, Université de Bordeaux.

[2] BIVERT B., 1988

Les souterrains du Nord-Pas de Calais. C Bernard Bivert, Cuincy, 1988.

[3] BLANC P., 1992

Etude de la stabilité d'une ancienne exploitation souterraine de Dolomie à Wasserbillig (Luxembourg). Rapport n° 91671. Décembre 1992.

[4] BEAUFRERE C., 1986

Stabilité des carrières souterraines abandonnées de l'Entre-deux-Mers (Gironde). Influence des facteurs géologiques et mécaniques. Thèse d'Université, Université de Bordeaux III.

[5] BONVALLET J., 1978

Critères de stabilité des exploitations souterraines à faible profondeur. Application au cas des carrières souterraines du Nord. Thèse de Docteur Ingénieur. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.

[6] BONVALLET J., DEJEAN M., SCHWARTZMANN R., 1978

Mesures des contraintes statiques et dynamiques dans les piliers des carrières souterraines peu profondes. Bulletin de liaison de Laboratoire des Ponts et Chaussées n°98, pp. 33-40.

[7] BONVALLET J., 1978

Une classification géotechnique des craies du Nord utilisée pour l'étude de stabilité des carrières souterraines. Revue française de géotechnique n°8, pp. 5-14.

[8] BONVALLET J., BOTH J., PERAGALLO J., PILET Ph., WOJTKOWIAK F., 1983

Stabilité des carrières souterraines : méthodes d'auscultation dynamique. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n°26-27, pp. 193-200. Paris.

[9] BONVALLET J., CHAMBON C., 1980

Détermination d'un coefficient de sécurité dans les exploitations par chambres et piliers abandonnés. Revue Française de Géotechnique n°13, Novembre 1980.

[10] BERTRAND L., BONVALLET J., BOTH J., FEUGA B., WOJTKOWIAK F., 1982

Etude de l'influence d'un trafic routier de fort tonnage sur la stabilité de carrières souterraines abandonnées en Gironde. Détermination du confortement à mettre en oeuvre. Revue de l'Industrie Minérale, pp.1-14, juin 1982.

[11] BOURCART J., 1947

Etude des carrières souterraines de la Touraine. Circulaire série n°22, Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, Novembre 1947.

[12] BENANNI M., PIGUET J. P., 1992

Carrière souterraine de marbre de Saint Beat. Rapport interne, Laboratoire de Mécanique des Terrains (INERIS), Ecole des Mines de Nancy.

BIBLIOGRAPHIE

[13] DELBECQ J. M., 1977

La sécurité des carrières souterraines abandonnées dans la région Nord - Pas-de-Calais. Revue de l'Industrie minière, pp. 129-146. Mars 1977.

[14] DEJEAN M., SCHWARTZMANN R., 1980

Les excavations à faible profondeur. Cinq ans d'expérience dans l'évolution et la surveillance de leur stabilité. Communication au Symposium International : "La sécurité des ouvrages souterrains", pp. 12-23. Bruxelles, Mai 1980.

[15] DEJEAN M., 1981

Stabilité et consolidation des exploitations souterraines abandonnées. Rapport général. Revue Française de Géotechnique n°17, pp. 47-54. Novembre 1981.

[16] DEJEAN M., 1981

Mouvements de surface lors de travaux souterrains. Rapport général. Revue Française de Géotechnique n°17, pp. 71-76. Novembre 1981.

[17] DURVILLE J. L., HAMEROUX M., 1995

Carrières souterraines abandonnées. Risques et prévention. Stratégies et Méthodes de prévention. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur n°51, pp.113-127. Avril 1995.

[18] EVRARD H., 1987

Risques liés aux carrières souterraines abandonnées de Normandie. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées 150/151 Juillet-Août /Septembre-Octobre 1987, Référence 3195.

[19] GHOREYCHI M., 1983

Stabilité d'exploitation partielles avec piliers en état post rupture, application au cas des carrières souterraines de craie du Nord. Thèse de Docteur Ingénieur. Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire de mécanique des terrains de l'Ecole de Mines de Nancy .

[20] GHOREYCHI M., SCHWARTZMANN R., 1983

Mise en charge hydraulique des terrains. Application à l'étude de la stabilité des carrières souterraines. Rapport CERCHAR 83 (1) 22.72.1065/01, Avril 1983.

[21] HELAL H., 1982

Etude et développement d'une méthode de mesure des contraintes par surcarottage. Application à l'étude de stabilité des ouvrages souterrains. Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole de Mines de Nancy.

[22] JOSIEN J. P., 1977

Surveillance de la stabilité d'une excavation souterraine par des mesures de déformation. Choix d'une méthode d'alarme. Annales des Mines n°3, pp. 51-62. Mars 1977.

[23] JOSIEN J. P., TRITSCH J. J., BENNANI M., 1993

Etude de stabilité des carrières souterraines classées de Meudon. Rapport interne INERIS, Laboratoire de Mécanique des Terrains. Mars 1993.

[24] JOSIEN J. P., 1995

Carrières souterraines abandonnées. Risques et prévention. Diagnostic et caractérisation des Aléas. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur n°51, pp.95-111. Avril 1995.

[25] KHEDER K., TRITSCH J. J., WATELET J. M., PIGUET J. P., 1995

Etude des conditions de stabilité et des facteurs déclenchant l'instabilité dans les carrières souterraines complexes exploitées par chambres et piliers abandonnés : application à une carrière sous un flanc de coteau. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XVIII, n°. 1-2, Pologne.

BIBLIOGRAPHIE

[26] KHEDER K., 1996

Les carrières souterraines complexes : Analyse statistique et modélisation. XIV^{èmes} Journées de l'AUGC, Clermont-Ferrand. Prix Jeunes Chercheurs "René Houpert", 1996 (à paraître).

[27] KRANJC D., 1978

La propagation des montées de voûte dans les carrières souterraines du Nord. Rapport de stage 3^{ème} année ENSMIM, Juin 1978.

[28] LACOSTE A. C., PALAT P., 1972

L'inspection des carrières souterraines dans le département du Nord. Annales des Mines, pp. 27-40, Décembre 1972.

[29] LEPLAT J., 1973

Les cavités souterraines de la craie dans le Nord de la France. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Spécial V, pp. 123-148, Octobre 1973.

[30] MAURY V., 1979

Effondrements spontanés. Synthèse d'observation et possibilité de mécanisme initiateur par mise en charge hydraulique. Revue de l'Industrie Minière, Octobre 1979.

[31] MASURE Ph., 1995

Carrières souterraines abandonnées. Risques et prévention. Gestion des risques et des crises liés à l'instabilité des carrières souterraines abandonnées. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur n°51, pp.130-137. Avril 1995.

[32] PIGUET J. P., AL HEIB M., 1992

Etude géotechnique de la stabilité des carrières de Wasserbillig (Luxembourg). Rapport interne. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[33] REYMOND M. C., 1987

Evaluation des déformations des piliers par émission acoustique dans une carrière souterraine. Revue Française de Géotechnique n°41, pp. 73-80

[34] RODE N., 1989

Les carrières souterraines en Gironde : analyse des effondrements anciens et récents, étude de quelques cas spécifiques d'effondrement et synthèse des nouvelles techniques de confortement. DEA. Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Géomécanique de l'Ecole de Géologie de Nancy.

[35] SCHWARTZMANN R., 1980

Caractérisation du toit de la carrière des Glacis à Valenciennes. Rapport CERCHAR n°80.76.2510/07, Novembre 1980

[36] SCHWARTZMANN R., BIVERT B., 1986

Surveillance des carrières souterraines abandonnées par des mesures de déformation. Revue de l'Industrie Minière, pp. 293-303. Août-Septembre 1986

[37] SCHWARTZMANN R., 1986

Surveillance et sécurité des ouvrages et des sites en Génie Civil et Minier. Séminaire Commett, Nancy 13, 14 et 15 Juin 1986. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[38] TIJANI S. M., 1982

Calcul analytique approché de la stabilité des mines exploitées par chambres et piliers abandonnés. Revue de l'Industrie Minière, supplément, pp. 109-111. Février 1982.

BIBLIOGRAPHIE

[39] TINCELIN E., 1982

La stabilité de la surface à l'aplomb des exploitations souterraines en mines métalliques ou assimilées. Piliers abandonnés ou îlots. Revue de l'Industrie Minérale, supplément de Février 1982.

[40] TOULEMONT M., CAILLEUX B., MAIRE J. L., 1988

Prévision des risques d'évolution des anciennes carrières souterraines de gypse de la région parisienne. Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées n°158, pp. 5-17. Paris.

[41] VACHAT J. C., 1982

Les désordres survenant dans les carrières souterraines de la région parisienne. Thèse CNAM, Paris.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES

[42] AL HEIB M., 1993

Les nouvelles méthodes de modélisations numériques et le volume d'influence des exploitations minières en conditions complexes. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire de Mécanique des terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[43] ARCAMONE J., 1980

Méthodologie d'étude des affaissements miniers en exploitation totale et partielle. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire de Mécanique des Terrains. Ecole des Mines de Nancy.

[44] ASOF M., 1988

Etude de la stabilité des ouvrages miniers dans les massifs rocheux fracturés par modèles de blocs (méthode des blocs clefs). DEA. Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[45] ASOF M., 1991

Etude du comportement mécanique des massifs rocheux fracturés en blocs (méthode à l'équilibre limite) : réalisation et applications. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[46] ARIF I., 1991

Modélisation des milieux anisotropes et fracturés : application aux exploitations ardoisières. Thèse de Doctorat de l'Institut Nationale Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[47] BERTIER P., BOUROCHE J. M., 1975

Analyse des données multidimensionnelles. Presses Universitaires de France - Paris.

[48] BARTON N. R., 1973

Review of a new shear strength criterion for rock joints. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n°7, pp. 287-332.

[49] BLES J. L., FEUGA B., 1981

La fracturation des Roches. Manuels et Méthodes n°1. Ed. Bureau de Recherches Géologiques et Minières d'Orléans.

[50] BRADY B. H. G. & BROWN E. T., 1985

Rock Mechanics for Underground Mining. Ed. George Allen & UNWIN.

BIBLIOGRAPHIE

[51] CUNDALL P., 1980

UDEC - a generalised distinct element program for modelling jointed rock. Peter Cundall Associates, Report PC AR-1 - 80, U. S. Army, European Research, Contract DAJA37-79 - 0548.

[52] CHAMBON C.

L'analyse statistique des données. Cours ENSMIN, Nancy.

[53] ENNOUR S., 1991

Modélisation des galeries rectangulaires de grande largeur en terrain stratifié. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[54] FILLIAT G., 1981

La pratique des sols et des fondations. C Ed. Le Moniteur, Paris.

[55] FERRERO A. M., DEL GRECO O., GIANI G. P., RANIERI G. & STRAGIOTTI L., 1990

Application of seismic tomography to the rock mass modelling. Mechanics of jointed and faulted rock, Rossmann (ed.) C 1990 Balkema. Rotterdam, ISBN 90 6191 1559.

[56] GOGUEL J., 1980

Géologie de l'environnement, Masson, Paris, 190 p., chapitre 3 : glissements et éboulements, pp. 29-44.

[57] GEORGE L., 1981

Influence de la profondeur et des facteurs naturels sur le comportement des ouvrages souterrains miniers. Thèse Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine.

[58] GHOREYCHI M., 1980

Etude du comportement à la rupture et après rupture des roches en vue de stabilité. DEA. Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole de Mines de Nancy.

[59] GOODMAN R. E., SHI G. H., 1985

Block theory and its application to rock engineering. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

[60] GOODMAN R. E., 1989

Introduction to Rock Mechanics, 2nd Edition. Ed. John Wiley & Sons, New York.

[61] GUILLOUX A., 1987

L'Utilisation de la méthode des éléments finis dans les projets de tunnels et ouvrages souterrains "Méthode des éléments finis dans les projets de géotechnique", pp. 49-68. Ed. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

[62] HENRY J. P., 1978

Mécanique linéaire de la rupture à l'étude de la fissuration et de la fracture des roches calcaires. Thèse de Docteur es Sciences, Université de Lille.

[63] HOMAND-ETIENNE F., HOUPERT R., 1978

Le comportement dilatant des roches. C. R. 1^{er} colloque Franco-polonais Wroclaw, Sci. pap. of the Inst. of Geotech. of Wroclaw Tech. Uni. n°28, ser. Conf. n°11, pp.141-150.

[64] HOMAND-ETIENNE F., RODE N., SCHWARTZMANN R., 1992

Modélisation par blocs de falaises fracturées. Revue Française de Géotechnique n°58, pp. 41-49. Ed. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris. Janvier 1992.

BIBLIOGRAPHIE

[65] HELIOT D., 1988

Conception et Réalisation d'un Outil Intégré de Modélisation des Massifs Rocheux fracturés en Blocs. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy. & Laboratoire Informatique et Analyse de Données de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy.

[66] HOEK E. & BROWN E. T., 1980

Underground Excavation in Rock. Institution of Mining and Metallurgy.

[67] ITASCA CONSULTING GROUP, 1991, 1992 et 1993

UDEC Version 1.8 & Version 2.0, manuel théorique & manuel d'utilisation. Minneapolis, USA.

[68] ITASCA CONSULTING GROUP, 1991, 1992 et 1993

3DEC Version 1.35 & Version 1.50, manuel théorique & manuel d'utilisation. Minneapolis, USA.

[69] JONES D.B. & SIDDLE H. J., REDDISH D. J. & WHITTAKER B.N., 1992

Landslides and undermining : Slope stability interaction with mining subsidence behaviour. International Congress on Rock Mechanics. Band/Volume/Tome 2. Ed. Wittke W., pp. 893-998.

[70] JANBU, N. 1954

Application of composite slip surfaces for stability analysis. Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm, 3, pp. 33-49.

[71] LEROU A., 1973

Texture et comportement des craies. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Spécial V, p. 49-53, Octobre 1973.

[72] LIN D., FAIRHURST C., STARFIELD A. M., 1987

Geometrical identification of three-dimensional rock systems using topological techniques. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24 N°6, pp.331-338.

[73] MORLIER P., 1966

Le fluage des roches. Annales de l'ITBTP, 217.

[74] NIANGOULA A., 1981

Contribution à l'étude de stabilité d'une ancienne exploitation de sel gemme par chambres et piliers abandonnés. Application au cas de la mine de sel de Varangéville. Thèse de Docteur Ingénieur. Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[75] PANET M., 1976

Propriété mécanique des roches. La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de Génie Civil. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Chapitre I, pp. 13-37.

[76] PANET M., RICARD A., 1976

Comportement mécanique des massifs rocheux. La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de Génie Civil. Chapitre VI, pp. 97-107.

[77] PIGUET J. P., 1974

La mécanique des terrains dans les couches puissantes des Charbonnages. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire de Mécanique des terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[78] PIGUET J. P., 1983

La modélisation en mécanique des terrains et son application à l'exploitation minière. Thèse Docteur es Sciences. Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

BIBLIOGRAPHIE

[79] **PINEAU J. L., 1978**

Contribution à la caractérisation géomécanique des roches. Application au minerai de fer de Lorraine. Thèse Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[80] **PRUNEAU M., 1977**

Comportement et propriétés mécaniques des joints. Rapport de stage, 3^{ème} année, ENSMIM, Juin 1977.

[81] **OWEN J., HINTON E., 1980**

Finite elements in plasticity. Theory and practice. Pinebridge Presse. Chapitre 7, pp.215-269.

[82] **OMRACI K., 1996**

Etude de la stabilité des décharges de Nouvelle Calédonie : cas de Mont Jardin. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire de Mécanique des terrains de l'Ecole des Mines de Nancy (à paraître).

[83] **ROCHET L., 1976**

Auscultation des ouvrages et des massifs rocheux encaissants. La mécanique des roches appliquée aux ouvrages du Génie Civil. Chapitre XI, pp. 183-214.

[84] **ROCHET L., 1976**

Propriétés mécaniques des discontinuités des massifs rocheux. La mécanique des roches appliquée aux ouvrages du Génie Civil. Chapitre V, pp. 79-95.

[85] **ROQUES M., 1986**

Chimie des carbonates et hydrogéologie karstique. Mémoire et doc. Phénomènes Karstiques. Edition du CNRS Volume 4.

[86] **RODE N., 1991**

Caractérisation et modélisation des massifs rocheux fracturés en blocs. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Géomécanique de l'Ecole de Géologie de Nancy.

[87] **SINGH B., 1973**

"Continuum Characterization of Jointed Rock Masses : Part I - The Constitutive Equations", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 10, pp. 311-335.

[88] **SAPORTA G., 1990**

Probabilités, analyse des données et statistique. Editions Technip - Paris.

[89] **STEAD D., BENKO B., 1993**

The influence of underground workings on slope instability : A numerical modelling approach. Proceedings of the First Canadian Symposium on Numerical Modelling Applications in Mining and Geomechanics / Montreal / Quebec / 27-30 March 1993. pp.207-216.

[90] **SARMA S. K., 1973**

Stability analysis of embankments and slopes. Geotechnique, 23, pp. 423-433.

[91] **STARFIELD A. M., CUNDALL P. A., 1988**

Towards a Methodology for Rock Mechanics Modelling. International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanics, Volume 25, n°3, pp. 99-106. Ed. Pergamon Press, London.

[92] **SCHWARTZMANN R., HOMAND-ETIENNE F., JOSIEN J. P., 1987**

Stabilité et surveillance de sites historiques. Géologie de l'Ingénieur appliquée aux travaux anciens. Balkema, ed. Rotterdam, pp. 11-20.

BIBLIOGRAPHIE

[93] **TIMOSHENKO S., 1962**

Théorie des plaques et coques. Ed. Dunod 1962

[94] **THORAVAL A., 1989**

Modélisation par blocs d'une longue taille. DEA. Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire de Mécanique des Terrains de l'Ecole des Mines de Nancy.

[95] **VINCHES M., 1988**

Application combinée de l'analyse structurale, de la géostatistique et de la théorie des blocs clés à l'étude des problèmes de stabilité et de confortement des travaux miniers. Revue Française de Géotechnique n°45, pp.59-70. Octobre 1988.

[96] **VERDEL T., 1990**

Géotechnique et monuments historiques, aspects méthodologiques. Rapport de DEA, Laboratoire de Mécanique des terrains de l'Ecole de Mines de Nancy, Institut National Polytechnique de Lorraine.

[97] **WARBURTON P. M., 1985**

A computer program for reconstructing blocky rock geometry and analysing simple block stability, Computers and geosciences, Vol. 11 N°6, pp. 707-712.

[98] **WARBURTON P. M., 1988**

Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces. International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanics, Volume 18, Ed. Pergamon Press, London.

[99] **WORL M. B., PALA J., 1982**

Three-Dimensional Stress Changes in pillars during long wall Mining at Ellalong Colliery. Report n°65 P.O. BOX 54, Mount Waterley, vic 3149, AUSTRALIA.

[100] **WITTKE W., 1990**

Rock Mechanics. Ed. Springer Verlag.

[101] **ZHANG K., DAI J., 1989**

Analyse des mécaniques de rupture et de chute du haut toit et influence sur la manifestation et le contrôle de la pression des terrains. 8th Strata Control Conference. DUSSELDORF, RFA, 1989.

[102] **ZARURA Q., MENCL V., 1982**

Landslides and their control. Ed. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

BIBLIOGRAPHIE

RAPPORTS CARRIERES SOUTERRAINES INEDITS INERIS & IGC Paris

[103] CTO-RSh/JS

79-76-9540/01-RAFFOUX J. F., SCHWARTZMANN R.

Carrières souterraines de Crouzilles. Société des chaux et Ciments de Paviers. Rapport de l'étude de stabilité.

[104] CTO-RSh-JTr/JS

85 (1)-98 72-1861/1-TRITSCH J. J., SCHWARTZMANN R.

Etude de stabilité de la carrière souterraine d'Heurtebize à Jonzac (17).

[105] CTO-RSh/JS

85 (1)-98 72-1861/02-SCHWARTZMANN R.

Etude de stabilité de la carrière souterraine d'Heurtebize à Jonzac (17). Rapport d'étude final - 1^{ère} partie.

[106] DEMOUGEOT H., FRANCK C., MARTIN P., VILMUS Th., 1995

Commune de ROMAINVILLE. Etude de la mise en sécurité des anciennes carrières souterraines "GAUVAIN". Phase 1 : reconnaissance de l'existant, synthèse des résultats à fin janvier 1995.

[107] DE LATI P., 1980

A la découverte des carrières souterraines de Paris. Monde et Minéraux n°39 1980.

[108] FINE J., HUMBERT B., VOUILLE G., 1987

Evaluation des risques d'affaissement de terrain à l'aplomb d'une carrière souterraine abandonnée : cas de la carrière du blanc minéral à Louveciennes. Journées d'étude sur l'utilisation de la méthode des éléments finis dans les projets de géotechnique. 17-18 Mars 1987, Paris.

[109] GAI-RSh/JS

88 (1)-98 71-1848/01 - POIROT R., WATELET J. M., SCHWARTZMANN R.

Commune de Morienvall. Etude de stabilité de la carrière souterraine St Clément.

[110] GAI-JMW/CS

71-6255/R01 - TRIART B., WATELET J. M., TRITSCH J. J.

CDZ - Carrière souterraine de paviers. Etat des lieux géotechnique de l'ancienne carrière souterraine. Confortement des zones évolutives.

[111] GAI-RSh-JMW/JS

90 (1)-98 71-1931/R01-DEGAUGUE P., WATELET J. M., SCHWARTZMANN R.

CDZ - Carrière souterraine de paviers. Etude des conditions d'abandon de l'exploitation.

[112] GAI-RSh/JS

87 (1)-98 71-1843/01-WATELET J. M., SCHWARTZMANN R.

Mutuelle générale des PTT. Etude géotechnique de la carrière souterraine de Meudon.

[113] GAI-RSh/JS

87 (1)-77 71-1402/02-SCHWARTZMANN R.

Etude géotechnique sommaire des carrières souterraines d'Aubigny à Taingy (89).

BIBLIOGRAPHIE

[114] GAI-RSH/JS

71-2601/R01-SCHWARTZMANN R., WATELET J. M.

Visite des carrières souterraines de Picardie : carrières de Vassens (SARL "La pierre de Vassens"), 23 janvier 1991. Carrière de Bonneuil en Valois, Etablissements Mascitti. Carrière du Clocher, 5 février 1991. Carrière de Noyant-et-Aconin, Société Bourgeois et Fils, 19 février 1991. Carrière de Septmont, Société Rocamat, 19 février 1991. Carrière de Belleu, Constructions et pierres de taille du Soissonnais, 19 février 1991. Carrière de Mello, Société des carrières Dubois - Carrière Notre-Dame, 26 février 1991. Carrière de Bonneuil en Valois, Etablissements Mascitti. Carrière du Transloy, 13 Mars 1991. Carrière de Bonneuil en Valois, Société Rocamat - Carrière des trois Fontaines, 13 Mars 1991.

[115] GAI-RSh/JS

87 (1)-98 71-1829/01-SCHWARTZMANN R., TRITSCH J. J., WATELET J. M.

IGC Versailles. Etude géotechnique de la carrière souterraine du Four à Chaux à Mery-sur-Oise.

[116] GAI-JTr-JMW/JS

88 (1)-98 71-1884/01- TRITSCH J. J., WATELET J. M., PIGNON C.

Etude de la stabilité et propositions du confortement de la carrière des Combarelles (Société DARGEMONT).

[117] GAI-JTr/JS

89 (1)-77 71-1402/02- TRITSCH J. J., PIGNON C.

Synthèse des principaux résultats et proposition d'un renforcement dans la carrière des Combarelles.

[118] GAI-JTr/JS

90 (1)-77 71-1402/R02- TRITSCH J. J., PIGNON C.

Synthèse des principaux résultats et proposition d'un renforcement dans la carrière des Combarelles.

[119] LE PAS DE SECHEVAL H., 1994

Mairie de Paris. L'inspection générale des carrières souterraines. Mines et Carrières - Industrie Minérale, Juillet 1994.

[120] LE PAS DE SECHEVAL H., 1994

Mairie de Paris. L'inspection générale des carrières souterraines. Rapport annuel, 1994.

[121] MAIRIE DE PARIS

Projet d'aménagement de la carrière souterraine du bois de Vincennes dite carrière de la Brasserie. Direction de la Voirie, Inspection Générale des carrières. Direction des Parcs, Jardins et Espaces Verts, Service Paris Espace Nature.

[122] MARVY J., VACHAT J. C., 1981.

Les anciennes carrières souterraines de la région parisienne. La pratique des Sols et Fondations, C Editions du Moniteur, Paris 1981.

[123] SCHWARTZMANN R., FEUGA B., 1989

La sécurité des anciennes carrières souterraines. Rapport interne, INERIS.

[124] SSE-JMW/VC

26EB82/R01-TRITSCH J. J., MILLERAND X., WATELET J. M.

Conflants-Sainte-Honorine. Etude des risques liés à la falaise - Secteur 1

[125] SSE-JWa/CS

26EA93/R01- WATELET J. M.

LANCTUIT, Carrière TSOUSHIMA Vernon (27). Etude des conditions de stabilité de l'exploitation en l'état.

BIBLIOGRAPHIE

[126] SCHWARTZMANN R., 1988

Département de Génie Civil et Transport., Vivre avec les carrières souterraines. Surveillance à long terme et télésurveillance des carrières souterraines. Ecole National des Ponts et Chaussées, direction de formation continue et de l'action internationale. Région Ouest de Paris, mardi 29 novembre au jeudi 1^{er} décembre 1988.

[127] TRITSCH J. J., 1992

Instabilités superficielles. Détection des vides proches de la surface. Rapport interne INERIS.

[128] TOULEMENT M., CAILLEUX B., MAIRE J. L., 1988

Prévision des risques d'évolution des anciennes carrières souterraines de gypse de la région parisienne. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°158, Novembre-décembre 1988.

RAPPORTS CARRIERES SOUTERRAINES INEDITS BRGM & S.C.S Gironde, Nord et Maine-et-Loire

[129] 68 SGL 160 AQI - ALLARD J. F.

Evolution et répartition des mesures de convergence dans des carrières à faible recouvrement. Carrières St-Georges à Saintes (17).

[130] 70 SGN 121 AQI - ALLARD J. F.

Confortement des carrières souterraines Saint-Géorges à Saintes (Charente-Maritime).

[131] 70 SGN 147 AQI - ALLARD J. F.

Résultats des mesures périodiques de tassement des terrains effectuées de 1967 à 1969 dans les carrières St-Georges à Saintes (17).

[132] 71 SGN 329 AQI - ALLARD J. F., JAUGEY P., LOUIS C.

Etude de la stabilité des carrières situées sous la propriété de l'A.I.A. à Latresne. Proposition de travaux de confortement.

[133] 72 SGN 145 AQI - ALLARD J. F.

Etude de la stabilité des carrières souterraines situées sous le Centre de Recherche de l'I.N.R.A. à Latresne (33). Proposition de travaux de confortement.

[134] 72 SGN 213 AQI - ALLARD J. F.

Problème de stabilité des carrières souterraines en zone urbaine.

[135] 72 SGN 194 AQI - ALLARD J. F., DUBREUILH J., LANDRY J., LHOSTE J.

Reconnaissance sommaire des carrières souterraines situées sous l'agglomération de ST-Emilion (33).

[136] 73 SGN 133 AQI - ALLARD J. F.

Commune de Baron (33). Expertise d'une champignonnière située à "LA BAREFAS".

[137] 73 SGN 135 AQI - ALLARD J. F.

Commune de Naujan-et-Postiac (33). Expertise d'une champignonnière située à "BELLEGARDE".

[138] 73 SGN 136 AQI - ALLARD J. F., CLOUARD M., LHOSTE J.

Commune de Fronsac (33). Expertise d'une champignonnière située à "CANON", Observations, mesures et essais.

BIBLIOGRAPHIE

- [139] 73 SGN 137 AQI - ALLARD J. F., BLANCHARD G., CLOUARD M. LHOSTE J.
Commune de Saint-Germain-du-Puch (33). Expertise d'une champignonnière située à "FONTVIDEAU", Observations, mesures et essais.
- [140] 74 SGN 090 AQI - ALLARD J. F.
Communes de Nérigeau et Baron (33). Expertise d'une champignonnière située au Château de Crain, Observations et mesures.
- [141] 75 SGN 162 AQI - ALLARD J. F.
Méthode adoptées dans le Sud-Ouest de la France pour l'étude de la stabilité des carrières souterraines.
- [142] ALLARD J. F., 1973
Etudes préventives de la stabilité de carrières souterraines en site urbain. Symposium National "Sol et Sous-sol" du BRGM - Cannes, Octobre 1973
- [143] 79 AQI 68 - ASTIE H.
Commune de Camblanes-et-Meynac (33). Expertise des carrières souterraines abandonnées situées à l'aplomb du hameau de Fontbonne et des terrains environnants.
- [144] R 36 509 NPC 4S 92 - ALLARD J. F.
Village-refuge souterrain de Rumilly-en-Cambrésis (Nord). Projet de valorisation touristique. Etude géotechnique préliminaire.
- [145] 89/16 SGR/PAL - ALLARD J. F., BARBEDOR J.
Confortement des carrières souterraines sous le CD n°116 à Villaines La Carelle (72). Compte rendu des travaux.
- [146] DS 67 A 109 - ALLARD J. F.
Etude géologique des carrières souterraines St-Géorges à Saintes. Proposition de solutions de confortement.
- [147] 76 SGN 171 AQI - BOTH J., LHOSTE J.
Carte de zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et sous-sol à 1/25000e - région de Latresne-Cambes - Le Tourne (33).
- [148] 78 SGN 366 - BOTH J., LHOSTE J., MENNECHET C.
Commune de Camblanes-et-Meynac (33). Etude des carrières souterraines abandonnées situées à l'aplomb du hameau de Fontbonne et des terrains environnants.
- [149] 78 SGN 356 BPL - BOTH J., FEUGA B.
Direction Départementale de l'Équipement de la Sarthe, Ville du grand-Luce (Sarthe). Reconnaissance préliminaire des carrières souterraines.
- [150] 82 SGN 230 NPC - BOVE Y.
Nord-France, Electricité-Charpente-Levage, Ronchin (Nord), rue Chaland. Recherche de cavités souterraines et étude géotechnique des sols de fondation.
- [151] 82 SGN 255 AQI - BERTRAND L., BONVALLET J., BOTH J., FEUGA B., WOJTKOWIAK F.
Département de la Gironde, D.D.E., Commune de St-Emilion. Etude de l'influence d'un trafic routier de fort tonnage sur la stabilité des carrières souterraines abandonnées situées à l'aplomb du CD 122, rue Guadet. Détermination du confortement à mettre en oeuvre.
- [152] 82 SGN 521 POC - BOTH J., MARCHAIS E., BOURGUEIL B., LEGENDRE L.
Direction départementale de l'équipement de la Vienne, Commune de MIREBEAU (Vienne), P.O.S.. Inventaire des carrières souterraines.

BIBLIOGRAPHIE

[153] 81 SGN 336 AQI - BERTRAND L., BONVALLET J., BOTH J., FEUGA B. WOJTKOWIAK F.

Département de la Gironde, D.D.E, commune de Daignac. Etude de l'influence d'un trafic routier de fort tonnage sur la stabilité des carrières souterraines abandonnées situées à l'aplomb du CD 11 E. Détermination du confortement à mettre en oeuvre.

[154] 81 SGN 536 NPC - BOVE Y.

Logival, Commune de Boursies (Nord). Lotissement "entre les deux chemins". Recherche de cavités souterraines éventuelles.

[155] 81 SGN 781 AQI - BERTRAND L., BONVALLET J., FEUGA B., WOJTKOWIAK F.

Département de la Gironde, D.D.E, commune de Croignon. Etude de l'influence d'un trafic routier à fort tonnage sur la stabilité des carrières souterraines abandonnées situées à l'aplomb du CD 115 entre le parking des Ets Lespeau et le carrefour avec le CD 936. Détermination du confortement à mettre en oeuvre.

[156] 87 SGN 771 AQI - BELLERON S., LHOSTE J.

Département de la Gironde, D.D.E, Commune de Puisseguin (33). Diagnostic de stabilité de la carrière souterraine abandonnée à l'aplomb du CD 21. Confortement à mettre en oeuvre.

[157] 84 AQI 63 - BOTH J.

Commune de Camblanes-et-Meynac (33) - Lotissement de fontbonne. Confortement des carrières souterraines. définition des moyens de traitements à mettre en oeuvre. Avant-Projet détaillé des travaux.

[158] 84 AGI 184 AQI - BEAUFRERE C., BOTH J., LHOSTE J., WOJTKOWIAK F.

Département de la Gironde, D.D.E., Commune de Latresne. Etude de la stabilité de la zone de carrière souterraine abandonnée située à l'aplomb du CD 10 E. Détermination du confortement à mettre en oeuvre et définition des dispositifs de surveillance.

[159] R 31047 AQI 4S 90 - BELLERON S.

Reconnaissance et avis géotechnique sur la stabilité des carrières souterraines situées sous le futur projet de chais au lieu-dit "AU VIGNEAU" sur la commune de St-Quentin de Baron (33).

[160] 88 SGN 857 AQI - BELLERON S., LHOSTE J.

Département de la Gironde, D.D.E., Commune de Prignac-et-Marcamps. Diagnostic de stabilité de la carrière souterraine abandonnée à l'aplomb du RD 133 au lieu-dit "AJANSIER".

[161] 90 AQI 31 - BELLERON S.

Reconnaissance et avis géotechnique sur la stabilité des carrières souterraines situées sous deux parcelles destinées à la construction au lieu-dit "BRUN" sur la commune de Latresne (Gironde).

[162] 83 AQI 45 - CARRARA F., WOJTKOWIAK F.

Département de la Gironde, D.D.E. de St-Emilion. Résultats des essais complémentaires au vérin plat et mise en place de dispositifs de surveillance dans les carrières souterraines abandonnées situées à l'aplomb du CD 122, rue Guadet.

[163] COULIN M., MAISONNEUVE E., 1986

Département de Maine-et-Loire, Service de Géologie du Département. Les cavités souterraines de Maine-et-Loire. Juin 1986.

[164] 75 SGN 315 PNO - DURAND E., GOUSTARD R., PASCAUD P.

Services Techniques de la Ville de CEAN. Carrières souterraines de CAEN (Calvados)

Etude de la stabilité de la carrière n°1 de l'Ecole de Médecine. Proposition de solutions d'auscultation et de confortement.

BIBLIOGRAPHIE

[165] 76 SGN 081 PNO - DURAND E., MARTEL C., MATHON C., MULLER M., PASCAUD P.

Service technique de la ville de CAEN, Carrières souterraines de CAEN (Calvados). Etude de la stabilité de la carrière n°2 de l'Ecole de Médecine et des carrières sises 18, 20, 22 et 26b rue de Calix à Caen.

[166] 79 SGN 288 NPC - DIEUDONNE A.

ARRAS (Pas-de-Calais), O.P. d'H.L.M. du département du Pas-de-Calais). Construction de 121 logements, Cité EISENHOWER. Recherche des cavités souterraines existant sous l'emprise du projet.

[167] 84 SGN 189 NPC/GEG - DURAND E.

Avis sur la stabilité de l'exploitation par chambres et piliers abandonnés, Carrières de Vassens.

[168] R 36934 AQI 4S 93 - DENIS A., LHOSTE J.

Service Spécial des Bases Aériennes Sud-Ouest, Subdivision A.I.A. Diagnostic de stabilité des zones de carrières souterraines situées sous la propriété de l'A.I.A. à Latresne (33).

[169] GAI-JMW/JS

87 (1)-22 71-1161/01-HOMAND ETIENNE F., WATELET J. M., 1987

Département de Maine-et-Loire. Stabilité des falaises sous-minées. Compte rendu de la mission des 3-6 février 1987 à Montsoreau (49).

[170] 80 AQI 11 - LHOSTE J.

Commune de Latresne (33). Reconnaissance des carrières sous la propriété de M. COMTE BERNARD au lieu-dit "Cote de la Bergerie".

[171] 84 AQI 72 - LHOSTE J.

Commune de Camblanes-et-Meynac (33). Etude de l'évolution des carrières souterraines situées à l'aplomb du CD 14 E1 aux lieux-dits "Pine-Livey Sud et Mangey Sud". Mise en place du dispositif de surveillance : Censyaleb - Résultats des premières mesures effectuées de 25.5.84 au 10.10.84.

[172] 87 SGN 443 AQI - LHOSTE J.

Commune de St-Laurent d'Arce (33) - Diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées à l'aplomb du CD 137 E - Confortement à mettre en oeuvre.

[173] 89 AQI 81 - LHOSTE J.

Commune de Voeuil et Giget (Charente). Expertise géotechnique de la carrière souterraine "LA ROCHE" (zone Nord). Détermination des travaux de confortement et de surveillance à mettre en oeuvre.

[174] 89 AQI 88 - LHOSTE J.

Commune de Garat (Charente). Expertise géotechnique de la carrière souterraine à Ste-Catherine. Diagnostic de stabilité et avis sur la qualité mécanique des terrains sus-jacents.

[175] R 34882 AQI 92 - LHOSTE J.

St Christophe des Bardes (Gironde, Château Lapelletrie. Avis géotechnique de la stabilité globale d'une carrière souterraine.

[176] R 32617 AQI 4S 91 - LHOSTE J.

Département de la Dordogne, Commune de Brantome. Etude géotechnique de la carrière située à l'Ouest de l'Eglise. Avis sur la stabilité globale.

[177] MAISONNEUVE E., 1987

Département de Maine-et-Loire, Service de Géologie et des Carrières souterraines. Situation des caves à proximité du réservoir de Montsoreau.

BIBLIOGRAPHIE

[178] MAISONNEUVE E., 1991

Département de Maine-et-Loire, Service de Géologie et des Carrières souterraines. Les cavités souterraines de Maine-et-Loire. Novembre 1991.

[179] MAISONNEUVE E., 1992

Département de Maine-et-Loire, Service de Géologie et des carrières souterraines. Blou-Carrières et caves de la Huetterie - Extraits de documents d'archives.

[180] MAISONNEUVE E., 1992

Département de Maine-et-Loire, Service de Géologie et des Carrières souterraines. Blou-R.D. 129, Sous-cavage de la voirie entre le Bourg et la Huetterie. Synthèse des données et mesures préconisées. Etat des connaissances au 14 août 1992.

[181] MAISONNEUVE E., 1995

Département de Maine-et-Loire, Service de Géologie et des Carrières souterraines. Les cavités souterraines en Maine-et-Loire. Juin 1995.

[182] PRIGENT D., POCHELSKI H.

Département de Maine-et-Loire, Service de Géologie et des carrières souterraines. Rapport sur l'état de la champignonnière de la Plesse en Fontaine-Milon.

[183] 82 AQI 20 - WOJTKOWIAK F.

Département de la Gironde, D.D.E., Subdivision de Libourne - Commune de Daignac(33). Confortement des carrières souterraines abandonnées situées à l'aplomb du CD 239 (ex 11 E). Contrôle des travaux de consolidation des piliers par boulonnage et béton projeté.

[184] 82 AQI 43 - WOJTKOWIAK F.

Département de la Gironde, D.D.E., Commune de Daignac. Etude de l'influence d'un trafic routier de fort tonnage sur la stabilité des carrières souterraines situées à l'aplomb du CD 239, note relative au comportement à long terme du calcaire de Daignac sous charge statique.

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE - I

- Tableau I.1 : Les formations géologiques dans la région parisienne.
Tableau I.2 : Mode d'exploitation des principales formations dans la région parisienne.
Tableau I.3 : Caractéristiques choisies dans les carrières pour l'étude statistique.
Tableau I.4 : Quelques accidents dans les carrières souterraines en France.
Tableau I.5 : Les accidents dans les carrières souterraines de la Gironde.
Tableau I.6 : Les accidents dans les carrières souterraines de Maine-et-Loire.

PARTIE - II

- Tableau II.1 : Caractéristiques mécaniques et physiques (annexe 2).
Tableau II.2 : Caractéristiques géométriques (annexe 2).
Tableau II.3 : Dégradation dans les carrières (annexe 2).
Tableau II.4 : Les facteurs de complexité (annexe 2).
Tableau II.5 : Corrélation des variables avec les deux premières composantes principales.
Tableau II.6 : Contribution des quatres premières composantes principales.
Tableau II.7 : Corrélation inter-classes entre les variables et le premier axe discriminant.

PARTIE - III

- Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques des couches (carrière sous flanc de coteau).
Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques des couches (carrière sous une falaise).
Tableau III.3 : Résultats des mesures au vérin plat et du calcul par l'aire tributaire.
Tableau III.4 : Caractéristiques physico-mécaniques des couches (carrière multiniveaux sous versant).
Tableau III.5 : Caractéristiques mécaniques des couches (carrière multiniveaux avec effondrement).
Tableau III.6 : Contrainte aux différents endroits des ouvrages selon les deux coupes.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

PARTIE - I

- Figure I.1 : L'exploitation de la pierre de taille en souterrain en France.
Figure I.2 : Résultats de l'analyse en composantes principales.
Figure I.3 : Mécanisme de rupture par fontis dans les carrières souterraines.
Figure I.4 : Mécanisme de rupture généralisée.
Figure I.5 : Méthode de calcul par l'aire tributaire.
Figure I.6 : Modèle proposé par TIMOSHENKO.
Figure I.7 : Modèle par éléments finis.
Figure I.8 : Modèle par éléments distincts.
Figure I.9 : Classification des types de blocs.
Figure I.10 : Analyse de stabilité des blocs isolés.
Figure I.11 : Possibilité de rotation des blocs.
Figure I.12 : Organisation générale du progiciel "RESOBLOK".
Figure I.13 : Contraintes verticales au sein d'un pilier.
Figure I.14 : Contraintes verticales dans un pilier fracturé.
Figure I.15 : Estimation des contraintes en 2D.
Figure I.16 : Les contraintes dans les piliers sains et fissurés en 3D.
Figure I.17 : Estimation des contraintes au toit en 2D.
Figure I.18 : Les contraintes au toit avec des piliers fissurés en 3D.
Figure I.19 : Effet du flanc de coteau sur la stabilité d'une mine.
Figure I.20 : Calcul par différences finies sur les ouvrages.
Figure I.21 : Calcul par UDEC sur des ouvrages souterrains.

PARTIE - II

- Figure II.1 : Méthodologie de recherche d'une base de données et analyse statistique.
Figure II.2 : Plan de la carrière de Camblanes et désordres.
Figure II.3 : Classification géotechnique des piliers.
Figure II.4 : Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP).
Figure II.5 : Résultats de l'analyse factorielle discriminante (AFD).
Figure II.6 : Projection des individus (carrières) sur le plan factoriel (AFD).

PARTIE - III

- Figure III.1 : Plan de la carrière avec les traces des deux coupes.
Figure III.2 : Vue en coupe avec les points critiques, coupe A-A.
Figure III.3 : Plan de la carrière souterraine Vernon (27).
Figure III.4 : Les hypothèses de calcul des contraintes initiales sous un flanc de coteau.
Figure III.5 : Conditions aux limites et choix de l'état initial.
Figure III.6 : L'effet du flanc de coteau sur la répartition des contraintes.
Figure III.7 : Méthodologie du calcul par modèles numériques.
Figure III.8 : Contraintes principales selon le sens d'exploitation.
Figure III.9 : Traces des points plastiques coupe A-A, du flanc de coteau vers le fond.
Figure III.10 : Traces des points plastiques coupe B-B, du flanc de coteau vers le fond.
Figure III.11 : Traces des points plastiques coupe A-A, du fond vers le flanc de coteau.
Figure III.12 : Conditions aux limites et maillage.
Figure III.13 : Traces des points plastiques, phases de creusement.
Figure III.14 : Traces des points plastiques, phases de creusement et de reprise.
Figure III.15 : Traces des points plastiques, phases de reprise.
Figure III.16 : Maillages et conditions aux limites dans les deux modèles.
Figure III.17 : Organigramme simplifié du programme "LOUPE".
Figure III.18 : Déformées des deux modèles, état initial.
Figure III.19 : Déformées des deux modèles après excavation.

LISTE DES FIGURES

- Figure III.20 : Isovaleurs des déplacements dans les deux modèles après excavation.
Figure III.21 : Contraintes majeures selon une coupe au toit dans les deux modèles.
Figure III.22 : Plan de la carrière, Niveaux superposés.
Figure III.23 : Plan de la carrière, Niveau supérieur.
Figure III.24 : Fracturations et zones déstabilisées dans le niveau supérieur.
Figure III.25 : Maillages et conditions aux limites pour les deux coupes.
Figure III.26 : Traces des contraintes principales en phase finale.
Figure III.27 : Traces des points plastiques.
Figure III.28 : Traces des points plastiques.
Figure III.29 : Conditions aux limites et maillage.
Figure III.30 : Correction des contraintes par l'aire tributaire.
Figure III.31 : Histogramme des contraintes calculées et corrigées (CESAR).
Figure III.32 : Histogramme des contraintes calculées et corrigées (CESAR).
Figure III.33 : Contraintes principales et points plastiques.
Figure III.34 : Contraintes et plasticité dans la zone avant effondrement.
Figure III.35 : Traces des contraintes principales selon les deux coupes.
Figure III.36 : Traces des points plastiques selon les deux coupes.
Figure III.37 : Maillages et conditions aux limites.
Figure III.38 : Les piliers les plus sollicités et quelques points de la planche.
Figure III.38 bis : Contraintes au sein des piliers limites et la planche avant et après effon.
Figure III.39 : Réseau de fracturation introduit dans le modèle.
Figure III.40 : Simulation de l'effondrement central, piliers très fracturés.
Figure III.41 : Sollicitation de la planche en terme des contraintes et de plasticité.
Figure III.42 : Simulation d'un effondrement, piliers supposés écrasés.
Figure III.43 : Conditions aux limites et maillage en 3D.
Figure III.44 : Les différentes étapes pour un calcul en 3D par phases (3DEC).
Figure III.45 : Tenseur moyen des contraintes principales dans le zone A (sans fractures).
Figure III.46 : Tenseur moyen des contraintes principales dans le zone B (sans fractures).
Figure III.47 : Tenseur moyen des contraintes principales dans le zone C (sans fractures).
Figure III.48 : Tenseur moyen des contraintes principales dans le zone A (avec fractures).
Figure III.49 : Tenseur moyen des contraintes principales dans le zone B (avec fractures).
Figure III.50 : Tenseur moyen des contraintes principales dans le zone C (avec fractures).
Figure III.51 : Evolution des contraintes déviatoriques dans les piliers (CESAR).
Figure III.52 : Evolution des contraintes déviatoriques dans les piliers (UDEC).
Figure III.53 : Evolution des contraintes déviatoriques dans les piliers (3DEC).
Figure III.54 : Conditions aux limites et maillage du modèle appliqué au pilier H.
Figure III.55 : Tenseur moyen des contraintes principales selon la densité du maillage.
Figure III.56 : Les étapes suivies dans le calcul par RESOBLOK.
Figure III.57 : Variation de volume de blocs instables en fonction de la puiss. et la cohé.

ANNEXE 1

ENQUETES CARRIERES

ANNEXE 1

SITE						
MATERIAU EXPLOITE		DATES				
NATURE DU RECOUVREMENT	HAUT					
	BAS					
exploitations sus-jacentes :						
hauteur du recouvrement (m) :	MOY.		min/max			
présence d'une dalle rigide au toit :						
pendage des couches :						
effet de versant :						
influence de l'hydraulique :						
GEOMETRIE DE L'EXPLOITATION						
nombre de niveaux exploités :						
forme des piliers :	réguliers		irréguliers			
décalage entre piliers :	orthogonaux		qui qu'on			
	bonne		mauvaise			
superposition des piliers :						
	NIVEAU	1	2	3	4	
hauteur galeries (m)	W					
largeur galeries (m)	l					
dimensions piliers (m)	l _{xp}					
taux défrutement (%)	t% moy.					
	t% max.					
planche intercalaire (m)	h.pl					
rapport L/H	L/H					
contrainte piliers	Qn(bars)					
(Q=dgh/1-t)						
CARACTERISTIQUES MECANIQUES		% satur.				
		E (bars)				
		Rc (bars)				
		Rt (bars)				
		Txy (bars)				
CARAC. DE L'EFFONDREMENT						
état de l'exploitation :	abandonnée		en cours			
surface effondrée (m2)	NIVEAU					
	S. effon				m2	
signes prémonitoires :						
phases d'effondrement :						
souffle d'air :						
circonstances particulières :	météo					
	nappe					
	venu. d'eau					
	vibrations					

CIRCONS. DE L'EFFONDREMENT

DATE

GISEMENT

METHODE
D'EXPLOITATION
ET
PARTICULARITESCIRCONSTANCES
DE
L'EFFONDREMENTCAUSES
AVANCEESNOMBRES
DES VICTIMES

ANNEXE 1

COMMUNE	
Exploitant :	
Substance exploitée :	
Epaisseur de la masse :	
Epaisseur exploitée :	
Epaisseurs laissées au toit :	
Terrains de recouvrement :	Nature : épaisseur : densité :
Epaisseur totale du recouvrement :	
Pendage du gisement variant de :	
Présence d'eau :	
Accidents géologiques :	
Surface totale exploitée à ce jour :	
Résistance de la roche :	état sec : état humide :
Résistance des piliers anciens :	état sec : état humide :
Densité de la roche exploitée :	
Forme des piliers :	
Dimensions des piliers :	hauteur : largeur :
Espacement des piliers :	
Superposition des piliers :	
Soutènement :	
Contrôle du toit	
Remblayage ou foudroyage éventuels :	
Accès aux vides :	
Taux de défrètement :	
Etat des piliers	sains : dégradés : très dégradés et ruinés :

ANNEXE 1

N° du parametre	Nom du parametre	Reponses possibles
1*	Identification de la carrière (voir exemple en fin de notice)	mettre un numéro à 4 chiffres Premier chiffre : 1. AQI, 2. PIC, 3. POC Deuxième et troisième chiffre : n° de la carrière (de 01 à 99) Quatrième chiffre : nombre de zones étudiées (de 1 à 9)
2	Relief	mettre le chiffre, correspondant à la différence entre les hauteurs de recouvrement maximale et minimale
3	Type d'exploitation	1. à un seul niveau 2. deux niveaux superposés 3. deux niveaux non superposés
4	Occupation du sol	1. zone urbaine 2. zone industrielle 3. zone de cultures 4. forêt 5. prairie (pâturage)
5	Age de la carrière	1. moins de 50 ans 2. entre 50 et 75 ans 3. entre 75 et 100 ans 4. entre 100 et 150 ans 5. plus de 150 ans
6	Superficie globale	en m2, à dix m2 près (pour les carrières à plusieurs niveaux d'exploitation, mettre la superficie cumulée et individualiser en "observations" la superficie de chaque niveau)
7	Nature de l'entrée	1. par puits 2. à flanc de côteau 3. les deux types
8	Nature du matériau excavé	1. calcarénite 2. calcarénite gréseuse 3. craie 4. craie argileuse 5. marno-calcaire
9	Utilisation de la carrière	1. inutilisée 2. stockage de matériaux inertes 3. stockage de matériaux organiques 4. autres utilisations

ANNEXE 1

10	Numéro de la zone	mettre le chiffre correspondant (2 pour deuxième zone par exemple)
11	Chargement à une distance de -15m du droit de la zone	1. rien 2. parking ou route 3. bâtiment en dur
12	Niveau d'exploitation	1. niveau unique 2. niveau supérieur (niveaux superposés) 3. niveau inférieur (niveaux superposés)
13	Epaisseur de recouvrement	à donner en mètres, au dm près si possible (dans le cas d'exploitation à niveaux superposés, préciser en "observations" l'épaisseur de la planche du toit du niveau inférieur)
14	Epaisseur totale des bancs du toit	à donner en mètres, au dm près si possible (préciser en "observation" la nature des terrains de recouvrement)
15	Distance à l'air libre	à donner en mètres au mètre près. C'est la distance la plus courte entre le bord de la zone et l'air libre
16	Distance au bord ferme	à donner en mètres, au mètre près. C'est la distance entre le bord de la zone et le bord ferme le plus proche
17	Discontinuités naturelles	2. présence de discontinuités 3. présence de conduits de dissolution (karst) 3. présence de discontinuités et de conduits de dissolution
18	Longueur cumulée de discontinuités naturelles dans le toit	à donner en mètres, au mètre près
19	Longueur cumulée de discontinuités naturelles dans les piliers	à donner en mètres, au mètre près
20	Infiltration	1. pas d'infiltration dans la zone 2. infiltrations au travers de la matrice 3. infiltration par des discontinuités

ANNEXE 1

21	Nombre de piliers dans la zone	inscrire le nombre
22	Nombre de piliers réguliers dans la zone	inscrire le nombre (un pilier est régulier s'il n'a pas de rentrant de plus de 50 cm de profondeur)
23	Hauteur moyenne de galerie contre pilier	à donner en mètres, au dm près (non comprise l'épaisseur d'un éventuel remblai)
24	Hauteur moyenne de remblais mis en place lors de l'exploitation	à donner en mètres, au dm près
25	Taux de défrètement	en pourcentage, au pourcentage près
26	Désordres observés au toit	1. pas de désordres 2. fissures mécaniques 3. décollements 4. chutes de blocs 5. montée de voûte
27	Désordres observés sur piliers	1. pas de désordres 2. fissures mécaniques 3. éclatements des coins 4. piliers ruinés
28	Profondeur, sous le sol de la carrière, de la nappe	à donner en mètres, au dm près (préciser s'il y a lieu, la hauteur de battement de la nappe en "observations")
29	Température	en °C, au °C près (pose du thermomètre sur pilier, à hauteur d'homme; mesure de la température deux heures après la pose)
30	Degré hygrométrique	en pourcentage, au pourcentage près (mesure de la même manière que la température)

* Exemple d'identification de la carrière

1 1 9 3
AQI carrière n°19 3 zones étudiées

3 0 9 2
POC carrière n°9 2 zones étudiées

ANNEXE 1

N°	Paramètres	Observations	N°	Paramètres	Observations
1			16		
2			17		
3			18		
4			19		
5			20		
6			21		
7			22		
8			23		
9			24		
10			25		
11			26		
12			27		
13			28		
14			29		
15			30		

Coordonnées (X
Lambert (Y
de l'entrée (Z
Cadastre :
Accès :
Géomorphologie :

Propriétaires :
Exploitants :
Utilisation :

Description

Nature du terrain :
Type de cavités :
Moyens d'accès :
Etendue :
Dimensions des galeries :
Recouvrement :
Aération :
Nappe phréatique :

[illegible]

Etat ancien

Etat général actuel

Dates de visites

Observations

Dégradations observées

Piliers :
Voûtes :
Effondrements dans la cavité :
Effondrements jusqu'au surface :
Affaissements en surface :
Fontis en formation :

ANNEXE 1

Fontis venus au jour :
Accès dégradé :
Eboulements de coteau :

Réalisations du Service

Pose de témoins :
Mesures préconisées :
Photographies :
Levé topographique :

Liste des documents topographiques

Anciens :
Récents, non levés par Service :
Récents, levés par Service :

Autres remarques

--

Croquis

--

ANNEXE 2

BASE DE DONNEES CARRIERES

ANNEXE 2

Notre base de données englobe quatre grands tableaux. Nous avons sélectionné 139 cas complexes sur l'ensemble des régions en France.

Dans le tableau II.1, nous avons les variables mécaniques et physiques de la roche :

Rc : la résistance à la compression simple à l'état saturé (MPa),
Rt : la résistance à la traction indirecte à l'état saturé (MPa),
Ru : la résistance de la roche en terme du fluage (MPa),
E : le module d'Young à l'état saturé (MPa),
Vi : la vitesse de propagation des ondes longitudinales à l'état saturé (m/s),
n : la porosité du matériau (%),
Psp : le poids spécifique du matériau à l'état saturé (KN/m³).

Dans le tableau II.2, nous avons des variables géométriques :

Sm : la section moyenne des piliers (m²),
CvS : coefficient de variation sur la section des piliers,
Lg : la largeur des galeries (m),
Tau : taux de défruitement (%),
CSr : le coefficient de sécurité (rapport entre la contrainte estimée et la résistance),
hv : la hauteur de vide (m),
Hr : la hauteur de recouvrement (m),
R : rapport entre la plus grande longueur et la hauteur de recouvrement (L/Hr),
Sc : superficie globale de la carrière (m²).

Dans le tableau II.3, nous avons des variables de dégradation :

Ps : piliers sains (%),
Pf : piliers fracturés (%),
Ptf : piliers très fracturés (%),
Eff : surface effondrée par rapport à la surface totale de la carrière (%),
Dfm : densité de fracturation mécanique (m/m²),
Dfg : densité de fracturation géologique (m/m²),
Karst : surface karstifiée par rapport à la surface totale de la carrière (%).

Dans le dernier tableau II.4, nous présentons les facteurs liés à la complexité tels que :

CE : cours d'eau à la surface,
FC : carrière sous flanc de coteau,
MN : carrière à multi-niveaux,
VE : venue d'eau dans la carrière,
KA : présence de karsts,
Eff : présence des effondrements,
SD : les charges statique et dynamique,
CO : les travaux à ciel ouvert (en activité ou non),
MP : présence d'un mur plastique au-dessous de la carrière.

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Ru (MPa)	E (MPa)	VI (m/s)	n (%)	Psp (KN/m3)
Gauvain 1ere masse	13.2	1.2	7.9	30000	3600	5	25.1
" 2eme masse	13.8	1.4	8.96	36000	3820	4	24.2
" 3eme masse	15.2	1.5	9.88	45000	4100	4	23.4
Brasserie 1ere zone ES	9.2	0.8	5.52	3900	2210	39	22
" 2eme zone ES	10.5	0.92	6.84	4120	2160	40	21
" 3eme zone EM	11.3	1.2	7.36	4340	3110	37	20
Aplomb Rue Bernier	4.2	0.35	2.52	1670	1120	41	23
Aplomb Rue Croquette	4.5	0.4	2.7	1430	1230	40.5	22.5
Louveciennes zone NW	2.42	0.25	1.45	1400	1620	38	19
" NINT	3	0.3	1.6	1500	1220	38	21
" zone NE	2.8	0.28	1.4	1300	1020	39	20.2
" zone SW	2.65	0.22	1.55	1200	2200	40	20.5
" NINF	3.2	0.31	1.7	1540	2600	39	21
" zone SE	2.15	0.2	1.35	1230	1700	37	18.5
Triel - Seine SAMC zone NW	10.5	1.1	6.7	23600	2500	6	26.4
" zone centrale	12.5	1.3	7.8	25000	3200	5	25.9
" zone NE	11	1.2	7.2	22400	2860	7	24.8
Mery - Oise zone A	5.2	0.4	3.12	2360	1240	38	19.5
" zone B	5	0.5	2.8	3145	1470	37	18.5
" zone C	3.7	0.4	2.4	1768	1115	39	20
" zone D	5	0.5	2.6	2390	1630	38	21
" zone E	4.7	0.45	2.9	2408	1410	39	19
Calvados	13.2	1.56	7.92	20000	4200	36	22.8
Ranteuil à Albi	3.5	0.4	2.1	5500	2700	38	22.5

Tableau II.1 : Caractéristiques mécaniques et physiques

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Ru (MPa)	E (MPa)	VI (m/s)	n (%)	Psp (KN/m3)
CDZ Paviers	6.5	0.35	3	1380	1120	39	19.1
Vassens	10.5	0.8	6.3	2460	1640	35	18
Bonneuil	10	0.9	5	2620	1750	34	18.2
Noyant-Aconi	12.5	1.25	9.38	3510	2340	32	17.2
Septmont	6.5	0.54	3.9	1480	1220	36	18
Belleu	5.5	0.42	3.3	1310	1230	37	18.7
Mello	4.5	0.35	2.7	1280	1130	38	19.2
Transloy	6	0.4	3.6	1450	1320	37	18.6
Trois Fontaines	5.9	0.5	4.2	2828	1885	36	18.2
Bourgeois	5	0.45	3	2860	1906	36	18.4
Meudon NSS	1.97	0.24	1.63	10157	1881	38	20
" NITS	2.5	0.28	1.93	10916	2071	40	20
" NIFS	1.99	0.25	1.56	6746	2129	37	20
" NSW	3.02	0.21	2.32	11244	2146	38	20
" NITE	2.47	0.27	1.82	8960	2264	40	20
" NIFW	2.84	0.26	2.07	11420	2224	37	20
" NIFE	2.43	0.18	1.6	6967	2570	37	20
St-Clement	1.8	0.4	0.9	2020	3200	37.5	20
Chantilly	3.85	0.5	2.3	6780	2801	38.2	20.5
St-beat NS	67.8	4	42	31398	4500	15	27
" NI	88	4	42	38562	4500	15	27
Vernon	9.2	0.7	4.8	4500	3000	34	21.5
CAMC NINT	13	1.4	8	26000	4000	8	26
SAMC NINF	13.5	1.3	8.6	27000	4100	8.5	26.5

Tableau II.1 (suite) : Caractéristiques mécaniques et physiques

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Ru (MPa)	E (MPa)	VI (m/s)	n (%)	Psp (KN/m3)
Latresne CD 10 E	1.43	0.2	0.9	1635	2579	35.9	17.2
St - Emillion NI	2.4	0.3	1.6	4519	2490	39.6	16.4
" NS SW	2.4	0.3	1.6	4519	2490	39.6	16.4
" NS NE	2.4	0.3	1.6	4519	2490	39.6	16.4
Croignon N	1	0.1	0.7	1245	1272	45.9	14.4
" S	1	0.1	0.7	1245	1272	45.9	14.4
Camblanes W	1.2	0.2	0.6	1170	2144	42.5	15
" E	1.2	0.2	0.6	1170	2144	42.5	15
Latresne W	2.3	0.3	1.4	1860	2524	29.3	18.6
" E	2.3	0.3	1.4	1860	2524	29.3	18.6
Daignac	4.1	0.4	2.8	8650	2600	40.4	16.9
Combarelles	12.4	0.8	7.5	5200	2250	38.2	18.5
Prignac RD 133	7.5	0.6	3.8	4700	1390	37	17.5
Jonzac	5.9	0.5	3.5	3830	2508	26.1	18
Crouzilles	6.5	0.5	3.3	1600	2300	40	16
Ste - même (16) NS	7.63	0.99	4.6	7740	3600	39.4	18.4
Saintes 17	9	0.8	6.1	2375	2260	26.8	19.5
Wasserbillig NS	65	5	39	42000	4300	10	24
" NI	65	5	39	42000	4300	10	24
Grozon (39) NI	31	2.9	20.2	9000	3600	4	20.5
" NIII	41	3.7	26.7	11800	3600	4	20.5
Canon	2.45	0.35	1.47	2620	1750	38	17.4
Château Lapelletrie	3.27	0.3	1.96	1650	1100	45	14.9
Château de Grain	2.47	0.68	1.48	1420	1310	39	16.2

Tableau II.1 (suite) : Caractéristiques mécaniques et physiques

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Ru (MPa)	E (MPa)	VI (m/s)	n (%)	Psp (KN/m3)
St - Georges	3.2	0.28	1.92	1230	1125	37	18.6
Fontvideau	1.7	0.34	1	3140	2090	39	18.6
Ste - Catherine	2.54	0.22	1.52	2820	1880	38	19.2
La roche	2.2	0.15	1.32	3040	2027	37	19.4
Bellegrade 1	1.9	0.34	1.14	1280	1170	36	19.2
Bellegrade 2	1.9	0.34	1.14	1340	1210	37	19.2
Barezac	1.55	0.46	0.93	1360	1240	38	18.8
Ouest de l'Eglise	4.9	0.62	2.94	868	820	34	20.2
Jansier RD 133	3.4	0.3	2.04	1720	1400	38	19
Daignac CD 11 E	4.5	0.42	2.7	1830	1560	37	18.5
CD 137 E	4	0.4	2.4	1650	1240	36	18.4
Daignac CD 239	3.8	0.35	2.28	1450	1020	39	19.2
Tauriac la Louze	3.6	0.32	2.16	1210	1118	40	20.1
Sainte Colombe	2.8	0.27	1.68	990	1000	36	18.6
St - Germain de la rivière	4	0.38	2.4	1310	1220	37	19.4
Camarsac	5	0.49	3	1540	1490	38	19
Prignac et Marcamps	6.5	0.52	3.9	2010	1880	39	19.6
Arbis	3.4	0.31	2.04	1740	1230	41	19.8
Gauriac	5.2	0.47	3.12	1890	1770	40	20.1
St - Laurent d'arc	4.2	0.4	2.52	1720	1590	38	21.2
Puisseguin	3.6	0.28	2.16	1550	1260	39	20.6
Ste - même (16) NIF	4.5	0.32	2.7	1560	1320	39	19.7

Tableau II.1 (suite) : Caractéristiques mécaniques et physiques

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Ru (MPa)	E (MPa)	VI (m/s)	n (%)	Psp (KN/m3)
Rumilly-Combresis zone A	3	0.35	1.6	2600	1650	36	20
" zone B	3.5	0.38	1.8	2800	1740	37	18.8
Petite Forêt zone A	4	0.37	2.2	2940	1540	38	19.2
" zone B	4.2	0.4	2.1	2850	1230	37	19
Ribecourt zone A	7	0.5	4.2	2280	1520	40	20.2
" zone B	6	0.45	4	2300	1600	39	20
" zone C	6.5	0.5	4.2	2350	1700	40	21
Avesnes le sec	2.5	0.3	1.8	1640	1200	37	18.5
St - Saulve zone A	4	0.35	2.4	1251	1170	35	18.2
" zone B	4.2	0.38	2.5	1340	1220	36	19.2
Lezennes Partie 1	4.3	0.42	2.2	2415	1610	39	19.6
" Partie 2	4.2	0.42	2.3	2157	1438	38	19.4
" Partie 3	4	0.4	2.2	2200	1520	39	19.2
" Partie 4	4.4	0.38	2.5	1820	1640	38	20
" Partie 5	4.6	0.4	2.6	1720	1700	37	21
" Partie 6	4.3	0.4	2.1	1470	1220	38	22
Hordain zone A	2.4	0.25	1.8	1020	890	37	18.8
" zone B	4.5	0.35	3.38	1416	1327	38	19.2
" zone C	3.4	0.27	2.1	1120	1070	37	18.6
Esnes	2.5	0.2	1.5	2200	1540	38	19.4
Combrai zone A	4.9	0.44	2.45	2590	1727	35	18.2
" zone B	4.4	0.42	2.25	2300	1520	38	19.4

Tableau II.1 (suite) : Caractéristiques mécaniques et physiques

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Ru (MPa)	E (MPa)	VI (m/s)	n (%)	Psp (KN/m3)
Valenciennes zone A	4.4	0.4	2.3	2460	1240	37	19.2
" zone B	4.2	0.38	2.4	2520	1370	36	18.5
" zone C	4	0.39	2.1	2200	1450	38	19.7
" zone D	5.2	0.42	3	2620	1820	35	18.5
" zone E	5.7	0.52	3.2	2910	1220	36	18.7
Marly zone A	4.7	0.48	2.35	926	1054	44	20.5
" zone B	4.8	0.5	2.42	1024	1225	42	20
" zone C	4.9	0.47	2.35	1080	1240	42	21
Place-Eglise RD 766-211	6	0.5	3.6	1110	1070	38	19
Butte St-Eusebe	4.5	0.4	2.7	2400	2200	37	19.4
Cunault - Ouest Château	3.5	0.3	2.1	1810	1470	36	18.8
Mimerolle	4	0.25	2.4	1070	990	40	20.4
Pièce Joulin	2.5	0.2	1.5	1230	1012	41	21.2
Cure - Chenehutte	5.4	0.5	3.24	1360	1140	39	20.1
Conbres	3.5	0.3	2.1	1450	1290	36	19.4
Bouffières	4	0.35	2.4	1520	1330	37	19.6
Cave Lemoine	4.5	0.42	2.7	1210	1100	38	19.4
Cave Neuve	4.3	0.38	2.6	1320	1020	37	20.1
Cave Martin	5.2	0.42	3.12	1710	1520	36.5	19.2
La Plesse	4.7	0.44	2.8	1820	1620	39.5	19.6
Blou (49) RD 129	2.5	0.2	1.5	1000	1080	40.5	20.3
" NIT	2.6	0.22	1.6	1200	1270	41	21.1
" NIF	3	0.25	1.8	1250	1020	40.5	20.7

Tableau II.1 (suite) : Caractéristiques mécaniques et physiques

ANNEXE 2

Carrières	Sp (m2)	CvS	Lg (m)	Tau (%)	Csr	hv (m)	Hr (m)	R	Sc (m2)
Gauvain 1ere masse	11.3	54.86	3.5	76	2.62	15	25	12	62000
" 2eme masse	10.2	50	4	75	4.36	6	45	5.6	62000
" 3eme masse	9.5	87.74	4.5	77	5.39	2	53	3.8	62000
Brasserie 1ere zone ES	12.5	96.8	6	80	4.95	2	45	2.2	8000
" 2eme zone ES	16.1	84.5	4.5	75	4.2	2.8	50	2.4	6500
" 3eme zone EM	24.2	63.2	5.5	77	4.17	3.5	48	1.9	7000
Aplomb Rue Bernier	14.2	64.8	5	70	2.76	3	36	1.4	2500
Aplomb Rue Croquette	12.5	82.4	3.5	81	4.97	3.4	42	1.9	3000
Louveciennes zone NW	550	3.7	4	33	1.13	10	40	7.5	60000
" NINT	28.8	35.1	4.5	59	1.18	7	23	8.7	20000
" zone NE	28.2	42.6	4	59	1.23	8	25	10	30000
" zone SW	29.3	45.4	4	58	1.71	8	35	5.7	36000
" NINF	29.6	48	3.5	58	1.4	7	28	8.9	35000
" zone SE	24.6	61.4	4	77	2.41	8	30	6.7	40000
Triel - Seine SAMC zone NW	24.7	33.2	5	76	2.86	5.7	26	7.7	30000
" zone centrale	32.5	46.8	5.5	59	1.9	4.5	30	8.3	25000
" zone NE	18.8	39.9	6	67.5	5.34	5.3	70	4.3	60000
Mery - Oise zone A	9.4	107.5	4	77	3.05	2.5	36	1.4	2500
" zone B	10.5	78.1	4.5	74	2.49	3	35	1.3	2000
" zone C	11.8	104.2	5.4	76	2.58	2	31	1.94	3000
" zone D	9.6	147.9	4.5	77	3.33	2.2	36.5	1.1	2000
" zone E	12.7	109.5	4	80	2.85	3.2	30	1	1500
Calvados	12.6	82.5	8	81	1.8	5.5	15	6.7	5000
Ranteuil à Albi	169.68	15.1	10	40	1.69	6	45	13.8	24000

Tableau II.2 : Caractéristiques géométriques

ANNEXE 2

Carrières	Sp (m2)	CvS	Lg (m)	Tau (%)	Csr	hv (m)	Hr (m)	R	Sc (m2)
CDZ Paviers	10.4	82	5.4	77	2.91	4	35	10	563700
Vassens	9	117	5.5	75	1.44	3.5	20	5	4000
Bonneuil	12.5	164	6.5	72	0.98	3.5	15	5.3	3500
Noyant - Aconi	14.6	209	7.5	69	1.11	3	20	5	4000
Septmont	10.2	141	5	78	1.23	4	15	6.9	4500
Belleu	15.6	117	8	69	1.33	3.5	22	5	5000
Mello	25.4	136	6.5	62	1.06	2.8	21	5.7	6000
Transloy	34.6	112	7	56	1.06	3.6	25	4.4	5000
Trois Fontaines	20.4	209	7.5	68	1.02	4.2	18	6.7	5000
Bourgeois	24.7	154	8	64	0.77	3	15	6	4800
Meudon NSS	45.2	33.2	4.5	55	0.71	4	16	9.4	16000
" NITS	25.5	41.6	4	61	0.93	5.5	18	8.9	16000
" NIFS	26.8	42.5	5	60	1.41	3	28	5.96	16900
" NSW	30.5	52.6	4.5	59	0.88	4	18	8.4	19200
" NITE	92.25	21.4	4	49	1.8	5.5	46	3.35	22400
" NIFW	40.7	34.5	5	54	0.78	3	18	9.6	24000
" NIFE	105.4	19	5	46	1.81	3	49	2.4	13200
St - Clement	14.8	156.1	6.2	69	0.35	2.9	5.5	36.4	10000
Chantilly	97.2	19.1	4.5	48	0.4	4.5	10	15	18600
St - Beat NS	475.41	4.6	11.3	35	7.27	7	175	2.57	62972
" NI	519.8	4.3	14	30	7.37	14.5	191	1.62	25688
Vernon	32	95	6.5	58	1.54	5	30	3.3	2500
SAMC NINT	18.4	50	6	68	6.09	5.2	75	2.7	30000
SAMC NINF	20.2	51	5	74	8.15	6	80	3.1	26000

Tableau II.2 (suite) : Caractéristiques géométriques

ANNEXE 2

Carrières	Sp (m2)	CvS	Lg (m)	Tau (%)	Csr	hv (m)	Hr (m)	R	Sc (m2)
Latrene CD 10 E	49.1	33.4	4	52	1.12	2.2	20	19	50000
St - Emillion NI	22.19	171.3	3.9	65	0.83	1.7	14.3	58.7	380000
" NS SW	32.55	29.09	7.1	57	0.34	1.9	7.2	77.8	240000
" NS NE	19.96	45.4	7.1	66	0.43	3.1	7.2	56.9	140000
Croignon N	14.26	56.5	3.9	70	0.45	1.8	7	49.4	120000
" S	32.13	190.3	3.3	58	0.28	2.3	6.2	64.5	160000
Camblanes W	18.73	98.4	3.6	67	0.88	1.8	14.7	41.5	200000
Camblanes E	24.16	124.1	3.7	63	0.68	2.2	12.9	30.2	150000
Latrene W	45.03	96.2	3.8	55	0.83	2.2	17.2	14.5	60000
Latrene E	22.24	101.2	4.9	65	2.04	2.1	33	11.8	90000
Daignac	53.3	200.1	4.5	50	1.06	2.5	20	5	5100
Combarelles	121.2	93.1	7	45	1.02	4.5	25	4.8	5950
Prignac RD 133	10.2	102.6	3.5	77	0.7	5.9	8	33.8	62500
Jonzac	11.2	54.2	3	76	1.66	2.5	20	11.3	42200
Crouzilles	12.5	70.1	5	72	2.4	3	35	25.7	563700
Ste - Même (16)	20.3	111.4	5.5	66	3.59	3.5	60	14.2	500000
Saintes - 17	21.52	88.6	11	65	0.98	2.5	15	24.1	70200
Wasserbilgig NS	12.6	155.6	7	72	3.5	8	38	17.5	200000
" NI	11.4	175.8	7	75	4.68	8	45	7.8	90000
Grozon (39) NI	115.92	82.9	6	43	1.42	2.5	35	21.4	400000
Grozon (39) NIII	36.7	54.6	6	55	1.94	2.5	38	17.1	300000
Canon	16.4	63	4.5	66	0.6	2.5	10	12	5000
Château Lapelletrie	5.9	132	3.5	78	0.23	2.2	3.1	39.4	5400
Château de Grain	9.5	131	3.2	78	0.52	2.5	6	21.7	6000

Tableau II.2 (suite) : Caractéristiques géométriques

ANNEXE 2

Carrières	Sp (m2)	CvS	Lg (m)	Tau (%)	Csr	hv (m)	Hr (m)	R	Sc (m2)
St - Georges	12.5	164	3.6	70	0.59	3.5	9.5	15.8	15000
Fontvideau	11.5	94	3.5	76	0.58	4	7.5	13.3	5000
Ste - Catherine	45.2	79	8	57	0.54	4.75	12	11.7	12000
La roche	24	119	9	63	0.52	5.5	10	10	5000
Bellegrade 1	17.4	175	4.2	67	0.41	2.5	7	11.4	4000
Bellegrade 2	13.5	124	5	70	0.58	6.5	10	8	4000
Barezac	10	90	4	76	0.55	5	7	17.2	10000
Ouest de l'Eglise	15.6	79	6	69	0.78	6.5	12	6.7	2050
Jansier RD 133	12.3	79.8	3.5	72	1.02	4	15	8	6000
Daignac CD 11 E	31.4	168.5	4	57	0.86	3.5	20	4.3	2500
CD 137 E	26.3	96.6	5.5	63	1.09	3	22	3.6	3500
Daignac CD 239	42.7	35.4	6	52	1.2	4.5	30	2.8	4000
Tauriac la Louze	18.6	54.5	4.5	67	1.95	2.8	34	2.8	5500
Ste - Colombe	11.5	61.7	5	75	1.34	6	18	4.2	3700
St - Germain de la rivière	20.8	72.6	4.5	66	0.57	5.4	10	8	4000
Camarsac	14.7	60.5	3.5	70	0.76	4.2	12	8.3	5000
Prignac et Marcamps	22.16	154.6	4	65	1.34	3.8	24	2.7	2700
Arbis	36.18	55.6	6	55	1.23	2.8	28	2.9	4700
Gauriac	19.26	139.8	5.5	64	1.68	3	30	3.2	5800
St - Laurent d'arc	16.27	53.1	6	66	1.94	3.5	32	3.1	6000
Puisseguin	19.82	169.7	4	65	1.97	3	35	2.3	4000
Ste - Même (16) NI	20.6	102.9	3.5	74	1.89	4	25	3.6	5000

Tableau II.2 (suite) : Caractéristiques géométriques

ANNEXE 2

Carrières	Sp (m2)	CvS	Lg (m)	Tau (%)	Csr	hv (m)	Hr (m)	R	Sc (m2)
Rumilly en Combresis zone A	16.4	68.3	4	66	0.59	2.8	10	9	4500
" zone B	18.6	67.7	3.8	69	0.49	3	8	12.5	5000
Petite Forêt zone A	10.8	63	3.5	75	0.92	4	12	6.7	3000
" zone B	9.4	107.4	4	77	1.24	3.4	15	4.7	2000
Ribecourt zone A	9.5	131	3.6	77	1.41	3	16	5	3500
" zone B	10.1	123.8	4	75.5	1.14	2.6	14	6.4	4000
" zone C	12.2	89.3	3.8	75	0.84	2.9	10	8.5	3000
Avesnes le sec	16.4	111	4.2	70	0.49	3.2	8	9.4	4500
St - Saulve zone A	11.8	134	2.8	75	1.26	2.4	15.5	7.1	2500
" zone B	12.9	77.5	3	74	0.74	2.5	10	6.5	3500
Lezennes Partie 1	18.21	140	3	69	0.82	2.1	13	7.7	7000
" Partie 2	18	58	4.7	69	0.63	2.5	10	10	6500
" Partie 3	16.3	81	3.5	70	1.28	4	20	3.5	3500
" Partie 4	18.6	110.8	4	69	1.29	2.8	20	4.3	4200
" Partie 5	14.4	98	4.2	70	1.4	3.2	20	4.5	4500
" Partie 6	15.3	66.7	3.8	70	1.32	4.5	18	5.6	6000
Hordain zone A	14.5	125.5	4.5	70	0.69	2.5	11	13.6	7500
" zone B	17.3	87.9	2.5	64	0.67	2.3	12.5	6	3750
" zone C	13.6	69.1	3.5	73	1	2.8	14.5	6.6	4200
Esnes	12.4	70.2	4	75	0.78	3	10	10	6000
Combrai zone A	16.6	13.2	4	70	0.88	2.1	14.5	8.3	4500
" zone B	11.8	215.3	3.8	75	0.93	2.5	12	6.7	4000

Tableau II.2 (suite) : Caractéristiques géométriques

ANNEXE 2

Carrières	Sp (m2)	CvS	Lg (m)	Tau (%)	Csr	hv (m)	Hr (m)	R	Sc (m2)
Valenciennes zone A	12.8	79.7	4.2	74	1.11	3	15	4.3	3500
" zone B	11.4	71.1	3.8	76	1.08	2.8	14	5.4	4000
" zone C	10.2	109.8	4	76	1.07	3.2	13	6.5	5000
" zone D	13.1	116	4.4	73	0.71	2.5	10	6.5	2500
" zone E	12.4	81.5	3.5	75	0.9	3	12	8.3	4000
Marly zone A	10.1	29.8	3	75.5	0.88	2.8	10.5	8.6	5400
" zone B	11.8	215.3	3.5	74	0.62	2.5	8	10	2600
" zone C	12.1	189.3	3	75	1.01	3	12	6.3	3000
Place - Eglise RD 766 - 211	15.4	163	3.5	66	1.4	2.5	25	2	1500
Butte St - Eusebe	16.8	73.8	2.5	67	0.24	1.5	4	20	3000
Cunault - Ouest de Château	9.4	144.7	4	77	1.63	2.6	20	4.5	4000
Mimerolle	10.2	149	5	75	2.04	3	25	3.4	3500
Pièce Joulin	14.7	124.5	3.5	70	2.12	3.2	30	2.5	2500
Cure - Chenehutte	16.1	59	4.5	70	0.8	2.4	12	8.3	6000
Combres	13.7	59.9	6.5	73	1.08	1.5	15	4.3	2500
Bouffières	14.3	114.7	2.5	70	1.7	2	26	3.7	4500
Cave Lemoine	10.8	59.3	3	75	1.4	3	18	6.7	6700
Cave Neuve	9.6	54.2	4.5	77	0.7	3.4	8	12.5	7200
Cave Martin	8.2	157.3	2	78	1.31	4.5	15	4.3	2800
La Plesse	11.7	117.1	4.5	75	0.94	3	12	6.3	3600
Blou (49) RD 129	12.8	78.9	5.5	74	2.19	2	28	3.2	5600
" NIT	15.4	60.4	4.6	70	2.11	2.5	30	3.2	5000
" NIF	14.3	85.3	2.8	70	2.42	3.5	35	2.4	3000

Tableau II.2 (suite) : Caractéristiques géométriques

ANNEXE 2

Carrières	Ps (%)	Pf (%)	Ptf (%)	Pr (%)	Eff (%)	Dfm	Dfg	Karst (%)	Iden
Gauvain 1ere masse	64	31	4	1	1	0.12	0.1	1	
" 2eme masse	72	20	6	2	3	0.13	0.11	1	
" 3eme masse	75	21	3	1	1	0.14	0.12	0.5	
Brasserie 1ere zone ES	68	30	1	1	2	0.12	0.1	0.5	
" 2eme zone ES	72	25	2	1	3	0.1	0.13	0.3	
" 3eme zone EM	54	35	9	2	2	0.1	0.15	0.4	
Aplomb Rue Bernier	12	62	22	4	1	0.13	0.1	0.5	
Aplomb Rue Croquette	15	73	10	2	1.5	0.12	0.14	0.6	
Louveciennes zone NW	75	25	0	0	0	0.1	0.1	1	
" NINT	40	45	10	5	3	0.1	0.2	0.5	
" zone NE	38	36	25	1	6	0.12	0.14	1	
" zone SW	42	38	15	5	5	0.15	0.16	2	
" NINF	52	45	2	1	6	0.13	0.1	0.6	
" zone SE	36	39	18	6	7	0.16	0.17	1	
Triel - Seine SAMC zone NW	15	35	30	20	11	0.6	0.5	12	
" zone centrale	30	45	23	2	3	0.4	0.35	4	
" zone NE	10	38	27	25	45	0.8	0.75	15	
Mery - Oise zone A	25	10	51	14	1	0.62	0.25	1	
" zone B	52	12	30	6	4	0.54	0.15	3	
" zone C	35	15	48	2	2	0.48	0.28	2	
" zone D	20	25	45	10	3	0.56	0.12	3	
" zone E	64	16	17	3	2	0.68	0.1	5	
Calvados	25	28	36	11	12	0.82	0.52	10	
Ranteuil à Albi	60	15	15	10	0	0.05	0.01	0	

Tableau II.3 : Caractéristiques de dégradation

ANNEXE 2

Carrières	Ps (%)	Pf (%)	Ptf (%)	Pr (%)	Eff (%)	Dfm	Dfg	Karst (%)	Iden
CDZ Paviers	67	24	5	4	20	0.79	0.52	19	
Vassens	90	10	0	0	1	0.1	0.1	2	
Bonneuil	78	15	6	1	5	0.2	0.2	5	
Noyant - Aconi	64	26	8	2	8	0.4	0.36	6	
Septmont	52	35	10	3	10	0.6	0.48	8	
Belleu	85	10	4	1	3	0.05	0.56	0	
Mello	46	32	18	4	10	0.5	0.62	10	
Transloy	48	28	22	2	12	0.4	0.68	9	
Trois Fontaines	46	34	16	4	6	0.3	0.28	4	
Bourgeois	37	38	20	5	9	0.5	0.42	10	
Meudon NSS	77	0	23	0	7	0.06	0.01	1	
" NITS	66	0	34	0	5	0.09	0.05	2	
" NIFS	78	0	22	0	3	0.07	0.04	1	
" NSW	78	0	22	0	5	0.08	0.04	1	
" NITE	61	0	39	0	0	0.01	0.03	2	
" NIFW	68	0	32	0	8	0.1	0.05	1	
" NIFE	54	0	46	0	2	0.01	0.07	3	
St - Clement	23	23	37	17	5.5	0.05	0.04	1	
Chantilly	11	22	67	0	18	0.15	0.05	7	
St - Beat NS	56	33	9	2	0	0.02	0	0	
" NI	60	30	7	3	0	0.02	0	0	
Vernon	75	25	0	0	3	0.1	0.5	10	
SAMC NINT	25	55	16	4	4	0.4	0.3	10	
SAMC NINF	32	53	12	3	2	0.3	0.25	11	

Tableau II.3 (suite) : Caractéristiques de dégradation

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Ps (%)	Pf (%)	Ptf (%)	Pr (%)	Eff (%)	Dfm	Dfg	Karst (%)	Iden
Latrene CD 10 E	19	31	50	0	10	0.2	0.07	6	
St - Emillion NI	14	42	44	0	0	0.9	0.12	0	
" NS SW	5	53	37	5	10	0.19	0.2	8	
" NS NE	5	53	37	5	5	0.19	0.2	8	
Croignon N	33	50	17	0	35	0.14	0.48	38	
" S	11	44	45	0	24	0.18	0.28	15	
Camblanes W	0	18	82	0	9	0.1	0.03	9	
" E	0	18	82	0	17	0.11	0.02	11	
Latresne W	8	27	65	0	5	0.05	0.05	19	
" E	8	27	65	0	19	0.14	0.01	5	
Daignac	46	29	17	8	27	0.13	0.12	4	
Combarelles	54	46	0	0	0	0.09	0	0	
Prignac RD 133	31	50	19	0	10	0.2	0.15	35	
Jonzac	47	30	16	7	0	0.18	0.12	3	
Crouzilles	67	24	4	5	7	0.79	0.22	0	
Ste - Même (16)	75	15	10	0	0.5	0.2	0.62	6.5	
Saintes - 17	35	25	25	15	0.6	0.3	0.26	5	
Wasserbillig NS	46	35	16	3	25	0.2	0.25	0	
" NI	66	23	10	1	20	0.2	0.25	0	
Grozon (39) NI	45	30	22	3	4	0.09	0.06	2	
" NIII	50	35	13	2	4	0.09	0.06	2	
Canon	28	30	32	10	30	0.42	0.5	15	
Château Lapelletrine	84	12	2	2	5	0.25	0.3	20	
Château de Grain	80	20	0	0	0	0.1	0.15	5	

Tableau II.3 (suite) : Caractéristiques de dégradation

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Ps (%)	Pf (%)	Ptf (%)	Pr (%)	Eff (%)	Dfm	Dfg	Karst (%)	Iden
St - Georges	30	28	30	12	35	0.58	0.55	25	
Fontvideau	90	10	0	0	5	0.2	0.35	5	
Ste - Catherine	100	0	0	0	0	0	0.2	1	
La roche	85	15	0	0	1	0.1	0.4	15	
Bellegrade 1	50	35	15	0	1	0.6	0.2	1	
Bellegrade 2	65	25	10	0	0.5	0.4	0.2	1	
Barezac	45	30	20	5	3	0.65	0.55	8	
Ouest de l'Eglise	40	20	30	10	20	0.54	0.38	12	
Jansler RD 133	35	40	21	4	15	0.58	0.29	10	
Daignac CD 11 E	58	23	17	2	25	0.63	0.52	8	
CD 137 E	42	34	23	1	10	0.42	0.38	12	
Daignac CD 239	64	30	6	0	3	0.16	0.18	9	
Tauriac la Louze	72	24	4	0	2	0.1	0.15	7	
Ste - Colombe	58	29	10	3	5	0.2	0.52	14	
St - Germain de la rivière	28	52	14	6	15	0.62	0.12	1	
Camarsac	62	28	8	2	4	0.18	0.41	13	
Prignac et Macamps	82	15	3	0	1	0.1	0.1	1	
Arbis	75	16	9	0	2	0.2	0.62	17	
Gauriac	15	48	27	10	30	0.75	0.64	25	
St - Laurent d'arc	68	27	4	1	4	0.13	0.11	4	
Puisseguin	56	34	8	2	6	0.17	0.82	5	
Ste - Même (16) NI	76	21	3	0	2	0.63	0.7	6	

Tableau II.3 (suite) : Caractéristiques de dégradation

ANNEXE 2

Carrières	Ps (%)	Pf (%)	Ptf (%)	Pr (%)	Eff (%)	Dfm	Dfg	Karst (%)	Iden
Rumilly en Combresis zone A	62	29	7	2	2	0.52	0.1	0	
" zone B	52	45	20	3	4	0.49	0.2	0	
Petite Forêt zone A	45	35	18	2	5	0.42	0.38	0	
" zone B	25	58	16	1	10	0.47	0.4	0	
Ribecourt zone A	28	37	33	2	10	0.35	0.1	1	
" zone B	30	40	26	4	8	0.48	0.2	1	
" zone C	43	38	16	3	7	0.52	0.15	1	
Avesnes le sec	56	29	15	0	2	0.15	0.18	1	
St - Saulve zone A	32	38	24	6	5	0.28	0.35	0	
" zone B	15	45	38	2	15	0.58	0.62	0	
Lezennes Partie 1	64	12	23	1	1	0.35	0.4	0	
" Partie 2	35	15	46	4	4	0.43	0.52	0	
" Partie 3	42	31	22	5	5	0.51	0.52	0	
" Partie 4	25	43	25	7	9	0.56	0.48	0	
" Partie 5	12	50	29	9	12	0.62	0.56	0	
" Partie 6	10	60	18	12	18	0.64	0.61	0	
Hordain zone A	54	28	18	0	3	0.25	0.25	1	
" zone B	41	40	16	3	7	0.35	0.37	1	
" zone C	22	54	18	6	9	0.41	0.49	1	
Esnes	68	22	10	0	1.5	0.2	0.16	1	
Combrai zone A	47	47	5	1	6	0.1	0.38	0	
" zone B	53	30	15	2	4	0.12	0.13	1	

Tableau II.3 (suite) : Caractéristiques de dégradations

ANNEXE 2

Carrières	Ps (%)	Pf (%)	Ptf (%)	Pr (%)	Eff (%)	Dfm	Dfg	Karst (%)	Iden
Valenciennes zone A	51	21	27	1	3	0.34	0.36	1	
" zone B	43	28	25	4	5	0.41	0.62	1	
" zone C	32	32	30	6	4	0.51	0.52	1	
" zone D	22	41	30	4	6	0.68	0.72	1	
" zone E	15	49	29	7	9	0.77	0.81	1	
Marly zone A	27	43	28	2	1	0.32	0.12	0	
" zone B	22	47	27	4	3	0.42	0.11	0	
" zone C	20	52	21	7	4	0.57	0.1	0	
Place - Eglise RD 766 - 211	64	31	4	1	2	0.48	0.42	0	
Butte St - Eusebe	58	26	6	0	3	0.51	0.35	0	
Cunault - Ouest de Château	54	18	23	5	4	0.62	0.41	1	
Mimerolle	38	42	17	3	5	0.6	0.53	0	
Pièce Joulin	42	53	3	2	1.5	0.32	0.47	1	
Cure - Chenehutte	25	51	19	5	6	0.71	0.65	0	
Combres	33	47	11	9	7	0.8	0.72	0	
Bouffières	40	33	26	1	9	0.58	0.42	1	
Cave Lemoine	28	26	40	6	8	0.61	0.6	0	
Cave Neuve	48	18	27	7	3	0.42	0.45	0	
Cave Martin	51	21	26	2	5	0.52	0.5	1	
La Plesse	39	31	29	1	3.5	0.48	0.41	0	
Blou (49) RD 129	16	42	32	10	4	0.3	0.25	1	
" NIT	25	52	16	7	5	0.5	0.35	0	
" NIF	28	37	29	6	2	0.2	0.15	1	

Tableau II.3 (suite) : Caractéristiques de dégradations

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Matériaux	CE	FC	MN	VE	K	Eff	SD	CO	MP
Gauvain 1ere masse	Gypse	1	1	1	1	0	0	1	1	0
" 2eme masse	"	1	1	1	1	0	0	1	1	0
" 3eme masse	"	1	1	1	1	0	0	1	1	0
Brasserie 1ere zone ES	Calcaire	0	0	1	1	0	0	1	0	0
" 2eme zone ES	"	0	0	1	1	0	0	1	0	0
" 3eme zone EM	"	0	0	1	1	0	0	1	0	0
Aplomb Rue Bernier	"	1	0	0	1	1	1	1	0	0
Aplomb Rue Croquette	"	1	0	0	1	1	1	1	0	0
Louveciennes zone NW	Craie	0	1	1	1	1	1	1	0	1
" NINT	"	0	1	1	1	0	0	1	0	0
" zone NE	"	0	1	1	1	0	0	1	0	0
" zone SW	"	0	1	1	1	0	0	1	0	0
" NINF	"	0	1	1	1	0	0	1	0	0
" zone SE	"	0	1	1	1	0	0	1	0	0
Triel - Seine SAMC zone NW	calcaire	0	1	1	1	1	1	1	0	0
" zone centrale	"	0	1	1	1	1	0	1	0	0
" zone NE	"	0	1	1	1	1	1	1	0	0
Mery - Oise zone A	"	1	0	1	1	1	0	1	0	0
" zone B	"	1	0	1	1	1	0	1	0	0
" zone C	"	1	0	1	1	1	0	1	0	0
" zone D	"	1	0	1	1	1	0	1	0	0
" zone E	"	1	0	1	1	1	0	1	0	0
Calvados	"	0	0	0	1	1	1	1	0	1
Ranteuil à Albi	"	0	1	0	1	0	0	0	1	1

Tableau II.4 : Les problèmes liés à la complexité des carrières

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Matériaux	CE	FC	MN	VE	K	Eff	SD	CO	MP
CDZ Paviers	Calcaire	1	0	0	1	1	1	1	0	0
Vassens	"	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Bonneuil	"	1	1	0	1	1	1	0	0	1
Noyant - Aconl	"	1	0	0	1	1	1	1	1	0
Septmont	"	1	0	0	1	1	1	0	0	1
Belleu	"	1	0	0	1	0	1	0	0	0
Mello	"	0	0	0	0	1	1	1	0	1
Transloy	"	1	1	0	1	1	1	1	0	0
Trois Fontaines	"	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Bourgeois	"	1	1	0	1	1	1	1	0	1
Meudon NSS	Craie	0	1	1	1	1	1	1	1	0
" NITS	"	0	1	1	1	1	1	1	1	0
" NIFS	"	0	1	1	1	1	1	1	1	0
" NSW	"	0	1	1	1	1	1	1	1	0
" NITE	"	0	1	1	1	1	0	1	1	0
" NIFW	"	0	1	1	1	1	1	1	1	0
" NIFE	"	0	1	1	1	1	1	1	1	0
St - Clement	Calcaire	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Chantilly	"	0	1	0	1	1	1	0	0	1
St - beat NS	Marbre	0	0	1	0	0	1	0	0	0
St - beat NI	"	0	0	1	0	0	1	0	0	0
Vernon	Craie	0	1	0	0	1	1	0	1	0
SAMC NINT	Calcaire	0	1	1	1	1	1	1	0	0
SAMC NINF	"	0	1	1	1	1	0	1	0	0

Tableau II.4 (suite) : Les problèmes liés à la complexité des carrières

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Matériaux	CE	FC	MN	VE	K	Eff	SD	CO	MP
Latresne CD 10 E	Calcaire	0	1	0	1	1	1	1	0	0
St - Emillion NI	"	1	0	1	1	0	0	1	0	0
" NS SW	"	1	0	1	1	1	1	1	0	0
" NS NE	"	1	0	1	1	1	1	1	0	0
Croignon N	"	1	0	0	1	1	1	1	0	0
" S	"	1	0	0	1	1	1	1	0	0
Camblanes W	"	1	0	0	1	1	1	1	0	0
" E	"	1	0	0	1	1	1	1	0	0
Latresne W	"	0	1	0	1	1	1	1	0	0
" E	"	0	1	0	1	1	1	1	0	0
Daignac	"	1	0	0	1	1	1	1	0	1
Combarelles	"	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Prignac RD 133	"	1	0	1	1	1	1	1	1	0
Jonzac	"	1	0	0	1	1	0	1	0	0
Crouzilles	"	0	1	0	1	0	1	1	1	1
Ste - Même (16)	"	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Saintes - 17	"	0	1	0	1	1	1	0	0	1
Wasserbillig NS	Dolomie	0	0	1	0	0	1	0	0	0
" NI	"	0	0	1	0	0	1	0	0	0
Grozon (39) NI	Gypse	0	0	1	0	1	1	0	0	1
" NIII	"	0	0	1	0	1	1	0	0	1
Canon	Calcaire	1	1	0	1	1	1	0	0	1
Château Lapelletrie	"	1	1	0	1	1	1	0	0	1
Château de Grain	"	1	0	0	1	1	0	1	0	1

Tableau II.4 (suite) : Les problèmes liés à la complexité des carrières

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Matériaux	CE	FC	MN	VE	K	Eff	SD	CO	MP
St - Georges	Calcaire	1	0	0	1	1	1	1	0	1
Fontvideau	"	1	0	0	1	1	1	1	0	1
Ste - Catherine	"	1	1	0	1	0	0	1	0	1
La roche	"	0	1	0	0	1	0	1	0	0
Bellegrade 1	"	1	1	1	1	0	0	0	0	1
Bellegrade 2	"	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Barezac	"	1	0	0	1	1	1	0	0	1
Ouest de L'Eglise	"	1	1	0	1	1	1	1	0	1
Jansier RD 133	"	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Daignac CD 11 E	"	1	0	0	1	1	1	1	0	1
CD 137 E	"	1	1	0	1	0	0	0	1	1
Daignac CD 239	"	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Tauriac la Louze	"	0	1	1	0	1	0	0	1	0
Ste - Colombe	"	0	0	0	1	1	1	1	0	0
St - Germain de la rivière	"	0	0	1	1	0	1	1	0	0
Camarsac	"	1	0	0	1	1	1	1	0	0
Prignac et Macamp	"	0	1	1	1	0	1	1	1	0
Arbis	"	1	1	0	1	1	0	1	0	0
Gauriac	"	0	1	1	1	1	1	1	0	1
St - Laurent d'arc	"	0	0	0	0	1	1	1	1	0
Puisseguin	"	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Ste - Même (16) NI	"	0	0	0	1	1	1	1	0	0

Tableau II.4 (suite) : Les problèmes liés à la complexité des carrières

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Matériaux	CE	FC	MN	VE	KA	Eff	SD	CO	MP
Rumilly en Combresis zone A	Craie	0	0	0	1	0	1	0	1	0
" zone B	"	0	0	0	1	0	1	0	1	0
Petite Forêt zone A	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
" zone B	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Ribecourt zone A	"	0	0	0	1	1	1	0	0	0
" zone B	"	0	0	0	1	1	1	0	0	0
" zone C	"	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Avesnes le sec	"	0	0	0	1	1	0	0	0	0
St - Saulve zone A	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
" zone B	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Lezennes Partie 1	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
" Partie 2	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
" Partie 3	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
" Partie 4	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
" Partie 5	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
" Partie 6	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Hordain zone A	"	0	0	0	1	1	1	1	0	0
" zone B	"	0	0	0	1	1	1	1	0	0
" zone C	"	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Esnes	"	0	0	0	1	1	0	1	0	0
Combrai zone A	"	0	0	0	1	0	1	1	0	0
" zone B	"	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Valenciennes zone A	"	0	0	0	1	1	1	0	0	0
" zone B	"	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Tableau II.4 (suite) : Les problèmes liés à la complexité des carrières

ANNEXE 2

Carrières souterraines	Matériaux	CE	FC	MN	VE	KA	Eff	SD	CO	MP
Valenciennes zone C	Craie	0	0	0	1	1	1	0	0	0
" zone D	"	0	0	0	1	1	1	0	0	0
" zone E	"	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Marly zone A	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
" zone B	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
" zone C	"	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Place - Eglise RD 766 - 211	Tuffeau	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Butte St - Eusebe	"	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Cunault - Ouest du Château	"	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Mimerolle	"	0	1	1	1	0	0	0	0	0
Pièce Joulin	"	0	1	0	1	1	0	1	1	0
Cure - Chenehutte	"	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Combres	"	0	1	1	1	1	0	1	1	1
Bouffières	"	0	1	0	1	0	0	1	1	0
Cave Lemoine	"	0	1	1	1	1	0	1	1	1
Cave Neuve	"	0	1	0	1	1	0	0	0	0
Cave Martin	"	0	1	1	1	1	0	1	1	1
La Plesse	"	0	1	1	1	0	0	1	1	1
Blou (49) RD 129	"	1	1	1	1	1	0	0	0	0
" NIT	"	1	1	1	1	1	1	0	0	0
" NIF	"	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Tableau II.4 (suite) : Les problèmes liés à la complexité des carrières

**AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE**

o o o

*Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Braboïs*

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur MANIA, Professeur, Université de Besançon,
Monsieur SIWAK, Professeur, Ecole des Mines de Douai.**

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur KHEDER Khaled

à soutenir devant l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Méthodologie d'études de la stabilité des carrières souterraines
complexes exploitées par chambres et piliers abandonnés".**

en vue de l'obtention du titre de :

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
LORRAINE**

Spécialité : **"GENIE CIVIL & MINIER"**

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDOEUVRE CEDEX

Fait à Vandoeuvre le, 18 Juin 1996

Le Président de l'I.N.P.L.,

M. LUCIUS

