

وزارة الجامعات والبحث العلمي  
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT GENIE CIVIL.

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**SYSTEME EXPERT  
POUR LE CHOIX DE LA RESISTANCE  
AU CISAILLEMENT DANS LES TALUS.**

Proposé par :

K. SILHADI.  
S. BELKACEMI.

Etudié par :

B. BENOTSMANE.  
A. BELGUIDOUM.

Dirigé par :

S. BELKACEMI.  
K. SILHADI.

PROMOTION -1992

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة الجامعات والبحث العلمي  
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL.

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**SYSTEME EXPERT  
POUR LE CHOIX DE LA RESISTANCE  
AU CISAILLEMENT DANS LES TALUS.**

Proposé par :

K. SILHADI.  
S. BELKACEMI.

Etudié par :

B. BENOTSMANE.  
A. BELGUIDOUM.

Dirigé par :

S. BELKACEMI.  
K. SILHADI.

PROMOTION -1992

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مكتبة  
BIBLIOTHEQUE —  
المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

وَقُلْ رَبِّ زَيْدٌ  
وَقُلْ رَبِّ زَيْدٌ

وَقُلْ رَبِّ زَيْدٌ زَعْلَمَا

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمِ

وزارة الجامعات والبحث العلمي - Ministère aux Universités et de la Recherche scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات - Ecole Nationale Polytechnique

Département : GENIE - CIVIL

Promoteurs : SILHADI.K et BELKACEMI.S

معملية الهندسة المدنية  
المكتبة - المكتبة  
الموجه : بلقاسم س. س.  
Ecole Nationale Polytechnique

Elèves ingénieurs : BENOSMANE.B et BELGUIDOUM.A - باري بلقيدوم ع .

الموضوع : نظام خبير من أجل اختيار المقاومة ضد القهر في المنحدرات  
الملخص : يهدف موضوعنا هذا إلى إنشاء نظام خبير يمكننا من  
إعطاء قرارات ومعلومات في نفس مستوى لقرارات المعطاة  
من طرف خبير إنساني من أجل اختيار المقاومة ضد القهر المستعملة  
في الدراسة التحليلية لاستقرار مستوى مائل (منحدر)

SUJET : Système expert pour le choix de la résistance au cisaillement dans les talus.

RESUME : Ce présent projet consiste en la réalisation d'un système expert permettant de donner des décisions comparable à celles d'un expert humain, en vue de la sélection de la résistance au cisaillement utilisée pour l'analyse de stabilité d'un talus.

SUBJECT : Expert system for the selection of the shear strength in the slopes .

ABSTRACT: The following project is aimed to design an expert system allowing to give decisions similar at those given by humain expert, with a view, to select the shear strength used for the slope stability analysis.

D E D I C A C E S

---oOo---

Je dédie ce modeste travail à :

- Ma très chère Mère

- Mon très cher Père

Pour leurs sacrifices .

- Mes frères et soeurs, tout en ayant une pensée particulière à mon frère aîné MUSTAPHA .

- Toute ma famille .

- Tous mes amis en particulier BELHADJ, MOHAMED et BOUALEM .

Pour leurs aides appréciables qu'ils m'ont apporté .

BOUALEM

---ooOoo---

Il m'est agréable de pouvoir dédier ce modeste travail à :

- Mes chers Parents qui m'ont aidé dans ma vie .

- Mes frères MALIK et SAAD .

- Mes soeurs .

- Tous mes amis en particulier NOUREDDINE, NOURI et RACHID .

- Toute ma famille .

Pour leurs aides appréciables qu'ils m'ont apporté .

ABDELKRIM

---ooOoo---

REMERCIEMENTS  
---oOo---

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à nos promoteurs Messieurs :

- BELKACEMI S.
- SILHADI K.

pour leurs explications détaillées, leurs aides et leurs suggestions pertinentes dans les domaines de la mécanique des sols et de l'informatique, et qui ont été très utiles pour l'élaboration de cet mémoire .

- A tous les enseignants qui ont contribué à notre formation .

- Aux membres du jury qui nous ferons l'honneur d'examiner notre travail .

- A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail .

A TOUS MERCI

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

- SOMMAIRE -

- S O M M A I R E -



- INTRODUCTION .....01

- PREMIERE PARTIE ETUDE THEORIQUE DES SYSTEMES EXPERTS.

- INTRODUCTION .....02

- CHAPITRE I : NOTIONS DE BASE

    I.1 - QU'EST CE QU'UN SYSTEME EXPERT ? .....04

    I.2 - QUALITE D'UN SYSTEME EXPERT .....04

    I.3 - A QUOI SERT UN SYSTEME EXPERT ? .....04

    I.4 - LA CONNAISSANCE : ELEMENT DE BASE .....05

    I.5 - PRINCIPES DES SYSTEMES EXPERTS .....07

    I.6 - LES PERSONNAGES EN ACTION .....09

    I.7 - ARCHITECTURE DES SYSTEMES EXPERT .....10

- CHAPITRE II : ACQUISITION ET REPRESENTATION DES CONNAISSANCES.

    II.1 ACQUISITION DES CONNAISSANCES .....12

    II.2 REPRESENTATION DES CONNAISSANCES .....12

        II.2.1 REPRESENTATION PROCEDURALE .....13

        II.2.2 REPRESENTATION DECLARATIVE .....14

        II.2.3 REPRESENTATION ORIENTEE OBJET .....17

- CHAPITRE III : LES STRUCTURES DE CONTROLE DANS LES SYSTEMES EXPERTS .

    III.1 INTRODUCTION .....20

    III.2 CHAINAGE AVANT .....20

    III.3 CHAINAGE ARRIERE .....21

    III.4 CHAINAGE MIXTE .....23

    III.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU CHAINAGE AVANT ET CHAINAGE ARRIERE .....23

EXEPLS DE SYSTEMES EXPERTS EXISTANTS DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL



- DEUXIEME PARTIE

- L'EXPERTISE -

- ETUDE THEORIQUE SUR LA STABILITE DES TALUS.

1. INTRODUCTION .....	25
2. NOTION DE FACTEUR DE SECURITE .....	25
3. RESISTANCE AU CISAILLEMENT D'UN SOL .....	26
4. FACTEURS CONTROLANT LES COURBES CONTRAINTE- DEFORMATION D'UN SOL .....	27
5. IDEALISATIONS DES COURBES CONTRAINTE-DEFOR- MATION .....	31
A. SOLS NON COHESIFS A GRAINS SPHERIQUES.....	31
B. SOLS NON COHESIFS AVEC UNE PROPORTION SUBSTANTIELLE DE GRAINS PLATS .....	34
C. SOLS COHESIFS .....	36
CONCLUSION.....	37

- TROISIEME PARTIE

- CONCEPTION DU SYSTEME EXPERT -  
- S E R C I S -

1. INTRODUCTION .....	38
2. UTILITE D'UN SYSTEME EXPERT .....	38
3. ETAPES SUIVIES LORS DE LA CONCEPTION DU SYSTEME .....	40
4. L'ACQUISITION DES CONNAISSANCES .....	42
5. $\Sigma$ log : OUTIL DE DEVELOPPEMENT DU SYSTEME - SERCIS - .....	45
6. LA STRUCTURE DU SYSTEME - SERCIS -.....	49
7. QUALITES DU SYSTEME - SERCIS -.....	54

CONCLUSION..... 55

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION :

L'intelligence artificielle a pour but principal de faire exécuter à l'ordinateur des tâches remarquables au même niveau que l'intelligence humaine.

Confrontés à de tels obstacles, les chercheurs ont essayé de développer de nouveaux outils capables de résoudre d'une manière efficace et intelligente ce genre de problèmes.

C'est ainsi que la technique des systèmes experts est apparue et depuis, un intérêt de plus en plus croissant lui est accordé, étant donné les résultats intéressants qu'elle a apporté au domaine de l'intelligence artificielle.

Ce mémoire est divisé en trois grandes parties :

- La première est consacrée à l'étude théorique des systèmes experts.
- La deuxième - "L'expertise" - définit le problème à traiter relatif à la stabilité des talus.
- La troisième est consacrée à la conception d'un système expert d'aide au choix de la résistance au cisaillement pour l'étude de la stabilité des talus.

Le système a été baptisé - " SERCIS " -

- PREMIERE PARTIE -

- ETUDE THEORIQUE DES SYSTEMES EXPERTS -

INTRODUCTION

## LES SYSTEMES EXPERTS .

### Introduction :

L'intelligence artificielle connaît depuis une dizaine d'années des développements importants , tant sur le plan de la recherche que sur celui des applications pratiques .

Les champs d'activités sont variés : traitement de langage naturel, interprétation d'images et vision, système expert, etc.. La plus part de ces développements concernent des systèmes à base de connaissances fondés sur l'utilisation explicite d'un ensemble de données et de connaissances spécifiques d'un domaine d'activité .

Les systèmes experts représentent un bon exemple, parmi d'autre, de système à base de connaissances . Les succès des systèmes experts ( S.E ) provient en partie du fait qu'ils ont permis d'aborder , avec des résultats significatifs, des tâches auparavant peu informatisées relevant du diagnostic , de la prise de décision, etc...

L' application des S.E au cours des années 70 correspondant à une évolution des objectifs de l'I.A, depuis la recherche des techniques générales de résolution de problèmes indépendants du domaine considéré, vers l'étude des mécanismes mis en jeu par un expert humain , pour résoudre un problème réel dans un champ d'activité bien précis .

Le projet pionnier en la matière fût DENDRAL lancé en 1965 par E. FEIGENBAUM, destiné à aider le chimiste à trouver la structure d'un composé organique à partir des données de son spectrogramme de masse et de sa formule chimique brute (BUCH 78).

Ce projet très ambitieux aboutit initialement à un énorme programme fortran dont la moindre amélioration entraînait des coûts prohibitifs de reprogrammation : les connaissances propre du domaine étaient intimement intégrées aux mécanismes de raisonnement .

Il émergea alors du projet l'idée qu'il fallait séparer explicitement des connaissances spécifiques d'un domaine de leurs mécanismes d'interprétation .

L'idée fondamentale des systèmes à bases de connaissances allait ainsi naître progressivement, avec la notion du moteur d'inférences exploitant un ensemble de connaissances et de faits pour résoudre un problème donné .

La méthode a été ensuite affinée avec l'expérience de systèmes tels que MYCIN dans le domaine du diagnostic médical (SHO 76) ou prospector en prospection minière (DUD 79).

Dans cette partie , nous aborderons successivement et en détail :

- Des notions de base sur les S.E en indiquant leurs principes du fonctionnement et leurs structures .
- Des techniques de représentation des connaissances : on y montrera le mode d'acquisition (extraction) des connaissances et les différentes manières de représentation de ces connaissances dans un ordinateur .
- Des structures de contrôle dans les systèmes experts : nous y décrirons le cycle de base d'un moteur d'inférences et les modes de raisonnement utilisés .

- CHAPITRE I -

- NOTIONS DE BASE -

- CHAPITRE I -

- NOTIONS DE BASE -



## CHAPITRE I

## - NOTIONS DE BASE -

### I.1 QU'EST CE QU'UN SYSTEME EXPERT ?

Un système expert est un système informatique capable de simuler le raisonnement d'un expert humain pour résoudre des problèmes dans un domaine bien précis .

Dans cette définition, on retrouve la dualité des S.E d'aujourd'hui :

- D'une part, la volonté de simuler le raisonnement humain.
- D'autre part, la nécessité de résoudre des problèmes concrets .

### I.2 QUALITES D'UN SYSTEME EXPERT

Les S.E étant conçus pour être utilisés par l'homme, de ce fait ils possèdent plusieurs qualités dont on cite :

- \* Dialogue en langage quasi naturel avec le spécialiste .
- \* Le système doit être compris du spécialiste et au besoin il explique et justifie son raisonnement .
- \* Le raisonnement doit-être simple pour être aisément explicable .
- \* Le spécialiste doit pouvoir transmettre aisément ses connaissances au système .
- \* Le système étant alimenté par plusieurs spécialistes, la connaissance doit être entrée en vrac, le système l'organise, la structure et la compare avec ce qu'il sait déjà et met enfin à jour son propre modèle de connaissances .

### I.3 A QUOI SERT UN SYSTEME EXPERT ?

Un système expert sert à résoudre des problèmes de nature symbolique par opposition à algorithmique .

En d'autre terme, puissance de raisonnement opposée à puissance de calcul .

Leurs caractéristiques essentielles sont :

- La manipulation de connaissances symboliques .
- Le raisonnement dans un univers incertain et incomplet.

#### 1.4 LA CONNAISSANCE : ELEMENT DE BASE

Dans un logiciel classique, la connaissance s'exprime principalement dans le séquençement des instructions . Un programme est un ensemble d'actions savamment ordonnées pour produire un résultat. On parle souvent de connaissances procédurales pour qualifier les logiciels classiques, la qualité intrinsèque de ce type de logiciels tient à la solution algorithmique qu'ils reproduisent on s'intéresse donc en priorité au "Comment" .

Les systèmes experts s'appuient sur une vision déclarative par opposition à procédurale. On s'attache à décrire très précisément le problème et le domaine d'application, on s'intéresse au "Quoi", On laissera ensuite à des mécanismes logiciels le soin de " raisonner " sur ces informations .

#### EXEMPLE

Vision procédurale	Vision déclarative
Tant que $i < 5$ faire	J'ai a,b,c
$a = b + i/c$	Je sais: SI a et b ALORS problème
	SI $c < 5$ ALORS a

Pour obtenir un système de qualité, il faut réussir à transférer la connaissance de l'homme à la machine. Cette connaissance constituera le coeur du système expert .

#### 1.4.1 QUE TROUVE-T-ON SOUS LE TERME "CONNAISSANCES" ?

Le mot connaissance recouvre l'ensemble des informations relatives au domaine d'expertise . Elles peuvent être très variées :

a. Faits :

Appelés aussi connaissances factuelles décrivant le problème qu'on cherche à résoudre .

Ce sont donc des connaissances qui ne sont pas permanentes comme ceux contenus dans la base de connaissances, mais qui sont propres à l'application ou au problème qu'on veut traiter .

EXEMPLE

- \* La diode 23 s'allume .
- \* L'interrupteur 31 est coupé .
- \* Gaze d'échappement bleus .

b. Connaissances opératoire :

Il s'agit du savoir-faire lié à la connaissance factuelle (faits) précédente. Elle permet d'utiliser les faits précédents pour générer de nouveaux faits .

EXEMPLE

SI la diode 23 s'allume

ALORS il y'a un problème de vanne .

Beaucoup de règles sont ce que l'on appelle des heuristiques .

Une heuristique est une connaissance typique de l'expert non absolue ou incertaine. Nous donnons ci-après un exemple pour mieux comprendre .

EXEMPLE

Un mécanicien de haut niveau va pressentir une certaine panne, la couleur d'un gaz d'échappement et l'occurrence préalable d'une révision vont lui suggérer (faire une supposition qui peut être vraie ou pas ) un problème au niveau de la lubrification, sans qu'il ait besoin à un examen complet de l'installation .

c. Métaconnaissances :

Il s'agit de connaissances sur la connaissance. Elles permettent d'utiliser intelligemment les connaissances factuelles et

opératoires et de simuler le raisonnement. Elles expriment des stratégies qui évitent l'énumération exhaustive en indiquant la meilleure approche pour un sous-but donné .

#### EXEMPLE

SI le patient est un hôte à risque .  
et SI il existe des règles qui mentionnent des pseudo-  
monias dans une de leur prémisses .  
et SI il existe des règles qui mentionnent des Kleb-  
siellas dans une de leurs prémisses .  
ALORS il est probable qu'il faille utiliser les  
premières avant les secondes .

#### I.5 PRINCIPE DES SYSTEMES EXPERTS

Un système expert comprend essentiellement trois parties :

a. Une base de connaissances :

Elle constitue la mémoire à long terme du système dans laquelle est codé l'ensemble des connaissances d'un domaine, à la fois de faits permanents, du savoir-faire et l'expertise pour résoudre un problème .

Elles doivent être décrites dans un format compréhensible par la machine et par les experts ( langage naturel, formalisme proche du parler ) ce format est appelé mode de représentation des connaissances qu'on expliquera plus loin .

b. Base de faits :

Contenant la totalité des faits ou données propres à un problème à résoudre. Il s'agit donc d'une mémoire de travail qui s'enrichera des faits nouveaux découverts par le mécanisme de raisonnement jusqu'à ce que l'on parvienne à la solution du problème .

Cette base (mémoire à court-terme) n'est pas conservée (sauf demande de l'utilisateur), elle dépend de la situation étudiée .

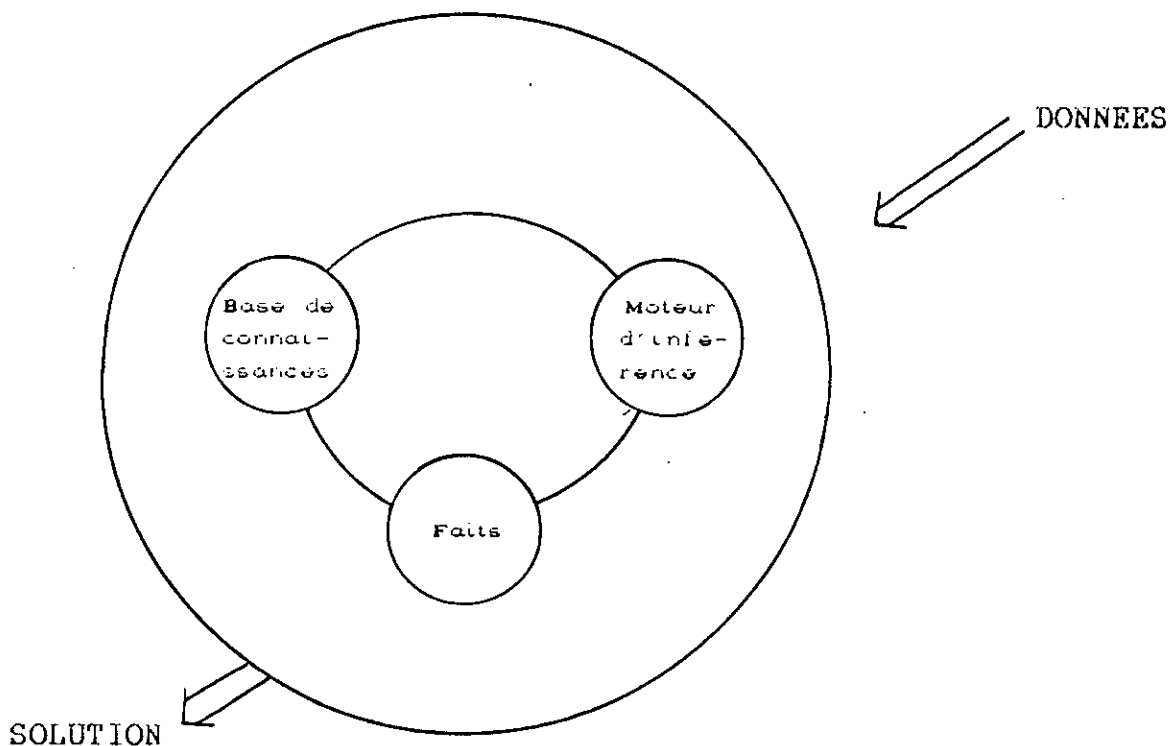
c. Moteur d'inférence :

Ou interpréteur, algorithme chargé d'exploiter d'une façon cyclique les connaissances et les faits pour mener un raisonnement.

Il exécute les inférences " déductions " au cours du processus de résolution, soit par modification, soit par adjonctions d'éléments à la base de faits .

Face à une situation donnée, il détecte les connaissances intéressantes, les utilise, les enchaîne, et construit un plan indépendant du domaine, et spécifique au cas traité .

Il existe plusieurs types du mécanismes d'inférences, les plus connues sont : Le chaînage avant et chaînage arrière .



## I.6 LES PERSONNAGES EN ACTION

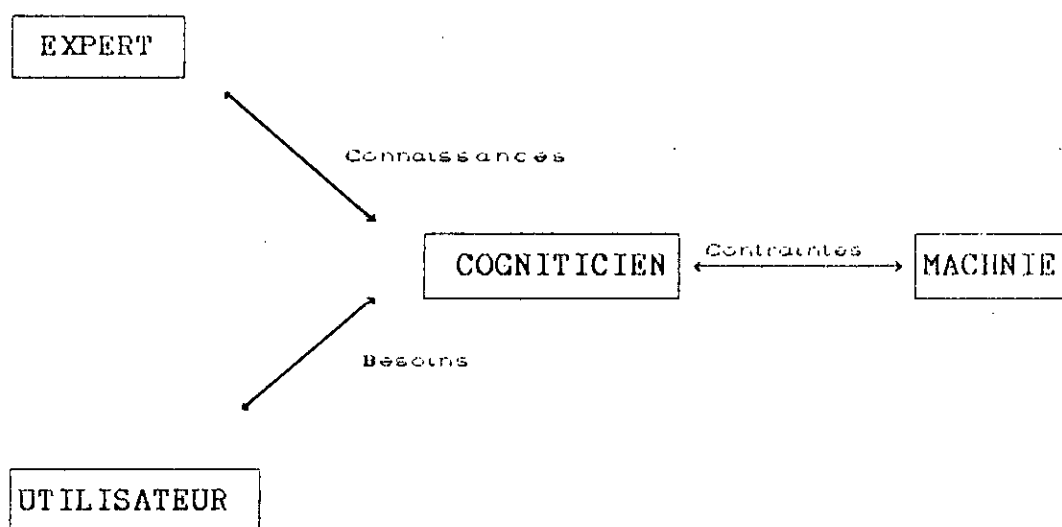
La puissance et l'efficacité d'un système expert dépendra essentiellement de la qualité de la connaissance qu'il aura en lui .

Pour avoir une connaissance de qualité, il faut un ou des expert (s) compétent (s), c'est de lui que proviendra toutes les informations utilisées par le système expert .

Un expert ne peut transmettre directement ses connaissances au S.E, il est nécessaire de passer par un intermédiaire qui regarde le problème et l'adopte aux possibilités des S.E c'est le cogniticien, son rôle est :

- D'acquies les connaissances de l'expert .
- De les modéliser .
- De les traduire en un langage compréhensible par la machine .

Enfin, le dernier personnage est l'utilisateur final du S.E, il est important de cerner parfaitement ses besoins, car le succès de l'applications passe aussi par lui .



PROCESSUS DE TRANSFERT DES CONNAISSANCES (BRI 88)

## I.7 ARCHITECTURE DES SYSTEMES EXPERTS

L'architecture des S.E reflète deux grandes choses :

- La volonté de séparer la connaissance du domaine d'application des mécanismes généraux de raisonnement.
- Le fonctionnement dynamique d'un système expert .

En plus des trois éléments constituant la structure d'un S.E, s'ajoute des modules d'interface, indispensables pour assurer le dialogue entre l'homme et la machine .

### - Interface utilisateur :

Appelée aussi système de consultation, elle assure le lien entre l'utilisateur final et le système, son rôle est de traduire les commandes que lui donne l'utilisateur et d'afficher les informations (questions du S.E, résultats) de façon claire et intelligible .

### - Module d'explication :

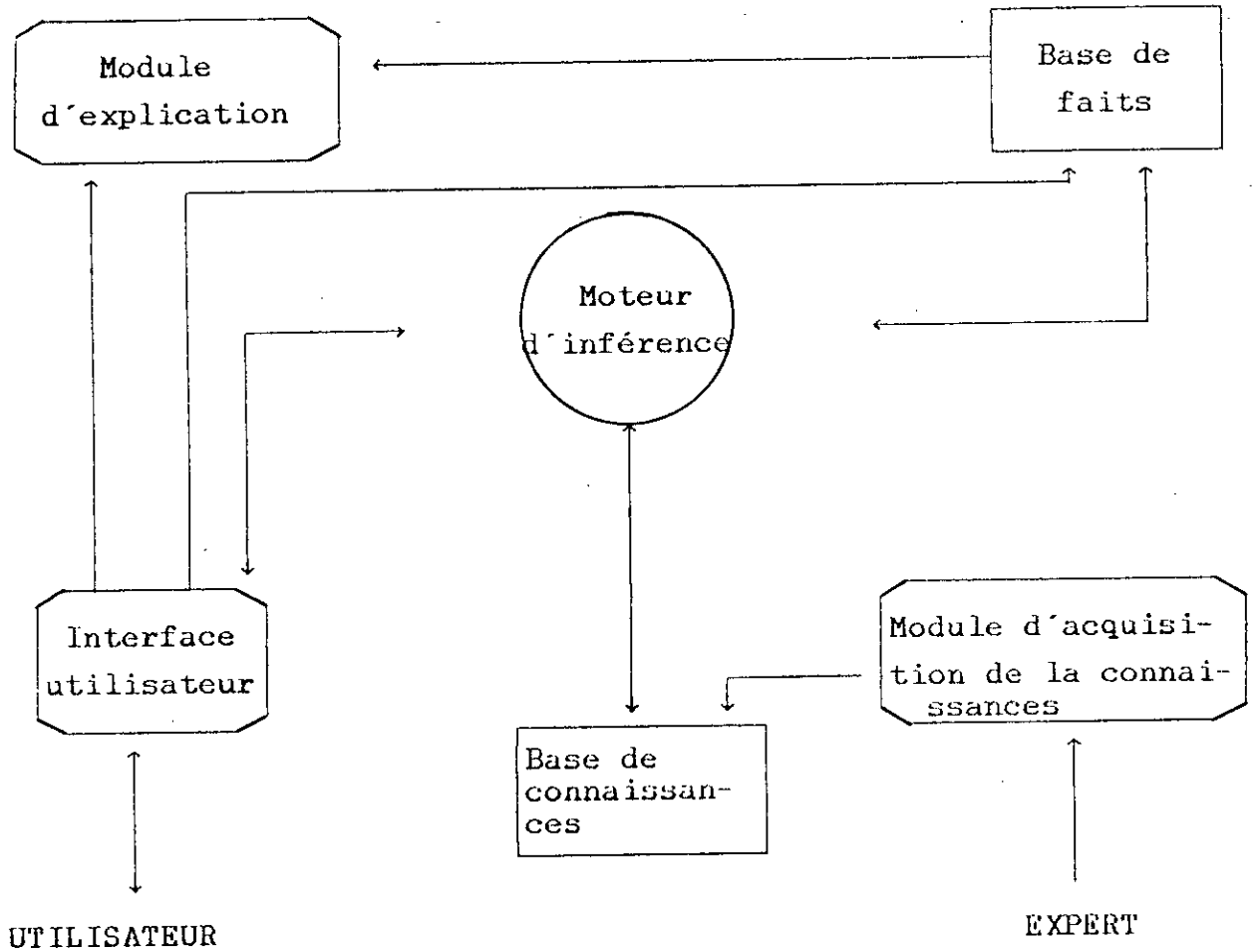
Les deux interrogations auxquelles le système doit être capable de répondre, sont :

- Comment un résultat a été établi ?
- Pourquoi le système a opté pour un processus de déduction c'est à dire comment il a déduit tel fait ?

### - Module d'acquisition des connaissances :

C'est un programme destiné à assister un expert dans l'élaboration de la base de connaissances.

Il reçoit les connaissances de l'expert en un langage, vérifie éventuellement la vraisemblance de ces dernières en gérant la cohérence de la base de connaissance, et transforme ces données en connaissances manipulables par le système .



ARCHITECTURE D'UN SYSTEME EXPERT



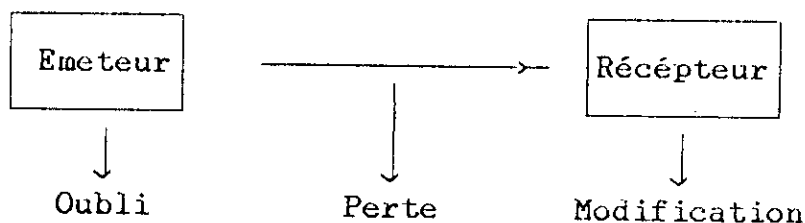
CHAPITRE II  
ACQUISITION ET REPRESENTATION  
DES CONNAISSANCES

## CHAPITRE II

### ACQUISITION ET REPRESENTATION DES CONNAISSANCES

#### II.1 ACQUISITION DES CONNAISSANCES

L'acquisition est cette transmission du savoir de l'expert vers le cognitifien , c'est un processus très long qui demande un travail important à la fois à l'expert et au cognitifien.



L'expert jouant le rôle de l'émetteur, va parler d'un sujet étendu et complexe, pour lequel il a peu l'habitude de parler, on a donc un risque d'oubli .

Le cognitifieu jouant le rôle de récepteur, va assimiler un grand nombre d'informations sur un sujet inconnu, on a donc un risque de modification d'informations .

Tous deux en utilisant un médium, "la parole", qui est très puissant, mais qui facilite le risque de perte de modification de l'information .

#### II.2 REPRESENTATION DES CONNAISSANCES

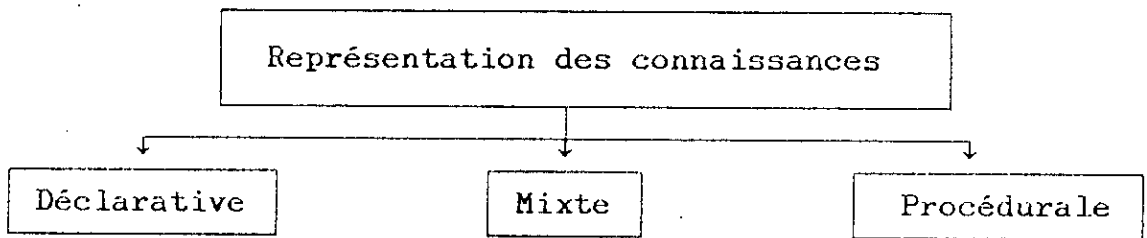
Représenter les connaissances dans un ordinateur consiste à trouver une correspondance entre le monde externe (forme externe) et un système symbolique (forme interne) permettant le raisonnement (BON 84) .

L'expert fournit sa connaissance au S.E sous sa forme externe, le mécanisme d'acquisition des connaissances code celle-ci sous forme interne, c'est à dire une structure de données (Tableau, liste, matrice), avant de l'ajouter à la base de connaissance .

La représentation des connaissances doit offrir une structure de données qui puisse :

- Stocker les connaissances en tant qu'information.
- Offrir une structure basée sur une stratégie qui:
  - \* Permet de reproduire le processus générant ou utilisant cette connaissance .
  - \* Prend en compte le poids de cette connaissance relativement aux connaissances du domaine .

Le choix du mode de représentation se présente comme une alternative entre représentation Procédurale et représentation déclarative ou mixte .



### II.1.2 REPRESENTATION PROCEDURALLE

La représentation procédurale est une représentation qui explicite les relations entre les éléments de connaissances utilisées. C'est une représentation algorithmique des connaissances (PIN 81), (BON 84).

Dans ce mode de représentation, les connaissances et leur traitement sont confondus. Elle propose des algorithmes de résolution, et utilise des variables et des tableaux pour modéliser la connaissance (FRE 88), (BED 85).

La représentation procédurale permet au sujet de produire des réponses sans pouvoir directement expliquer les éléments de ces réponses.

C'est une représentation qui donne lieu à l'écriture de programmes difficiles à modifier et à étendre en fonction de

l'évolution. Elle peut s'adapter seulement aux connaissances les plus structurées (BON 84).

### II.2.2 REPRESENTATION DECLARATIVE

C'est une représentation qui permet une expression de la connaissance sous forme de granules indépendants, et laisse au mécanisme de raisonnement, indépendant des granules, le soin de combiner les éléments de connaissances pour faire des déductions (PIN 81), (FER 86).

On regroupe dans cette catégorie toutes les formes basées sur des règles de production et des réseaux sémantiques.

#### II.2.2.1 LES REGLES DE PRODUCTIONS

Le mode de représentation à base de règles de production est le mode le plus utilisé actuellement. " Le principe de base de la programmation en règles de production est que chaque règle est un morceau indépendant de connaissances (granule), c'est à dire qu'elle contient toutes les conditions de son application" (BON 84).

Une règle est composée de deux parties: La condition ou prémisse, et l'action ou conclusion :

SI <condition> ALORS <action>

Un ensemble de règles de production est appelé système de production.

Les systèmes de production sont basés, suivant l'utilisation, sur la logique de calcul des propositions, et sur la logique de calcul des prédicats.

##### a. Le calcul propositionnel (ou des propositions)

La description des connaissances se fait sous forme de propositions qui ne peuvent prendre que les valeurs booliennes VRAI ou FAUX .

EXEMPLE

- La proportion d'éléments fins dans cet échantillon est faible .

Ces propositions peuvent être liées avec des connecteurs Telsque:

$\cap$  (ET),  $\cup$  (OU), - (NON),  $\implies$  (implique) et des parenthèses .

Le calcul des propositions est basé sur les règles suivantes :

- Le MODUS PONENS :

$$( X \text{ ET } ( X \implies Y ) \implies Y )$$

{ SI X est VRAI ET  $X \implies Y$   
ALORS Y est VRAI

- Le MODUS TOLLENS :

Il est l'équivalent du raisonnement par absurde

$$( \bar{Y} \text{ ET } ( X \implies Y ) \implies \bar{X} )$$

{ SI NON Y est VRAI ET  $X \implies Y$   
ALORS NON  $\bar{X}$  est VRAI

Exemple de règle de production basée sur la logique des propositions

SI X est VRAI  
ET  
SI Y est VRAI  
ALORS Z ( Possibilité de faire une analyse de stabilité )

b. Le calcul des prédicats :

Par rapport au calcul propositionnel, le calcul des prédicats peut en plus utiliser des généralités (utilisation des quantificateurs et de variables ).

Le calcul des prédicats permet de représenter :

- Les prédicats : ce sont des formules bien formées, prenant un ou plusieurs arguments (constante, variable) et retournant l'une des valeurs VRAI ou FAUX
- Les symboles de quantification universels  $\forall$  et  $\exists$ .
- Constantes ( a,b,c ).
- Variables (X,Y).

### EXEMPLE

(  $\forall X$  ) HOMME (X)  $\implies$  MORTEL (X)

Où HOMME et MORTEL sont des prédicats pouvant prendre l'une des valeurs VRAI ou FAUX.

Cette méthode de représentation utilisée dans la majorité des S.E MYCIN-DENDRAL, LITHO, possède certains avantages dûs à sa structure :

- Facilité de modification, du fait de la modularité des connaissances.
- Plus le système possède de règles et plus il est puissant ( en théorie ).
- Très grande lisibilité des règles et donc facilité d'écriture.

Mais le principal problème est la possibilité de perte de la cohérence logique et de la base de connaissances, du fait d'un nombre important de règles et de la difficulté de vérification manuelle de cette cohérence.

### II.2.2.2 LES RESEAUX SEMANTIQUES

Un réseau sémantique est un ensemble de noeuds appelés concepts, reliés par des arcs exprimants les relations qui peuvent exister entre ces noeuds. Les concepts peuvent être des entités, des individus, des situations etc ..., les noeuds jouent le rôle des termes et les arcs celui des prédicats en logique (VOY 87).

Les arcs représentant les relations entre noeuds sont de deux types :

IS a ( est un )

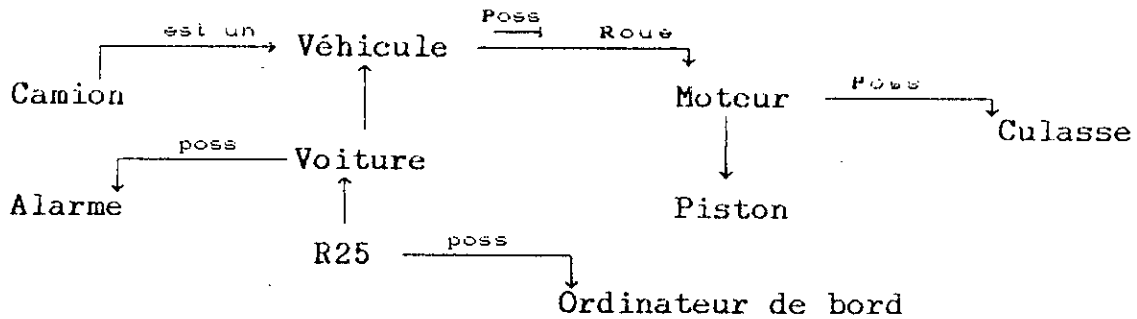
HAS part ( possède )

### EXEMPLE

Réseau sémantique pour véhicules :

Est un  $\longrightarrow$  Permet d'effectuer une classification des différents types de véhicules.

Possède  $\longrightarrow$  Permet d'affecter des propriétés aux différentes entités, ici les éléments constitutifs d'un véhicule.



### RESEAU SEMANTIQUE POUR VEHICULES

Une des propriétés intéressantes de ces relations est la notion d'héritage, ce qui est important dans cette notion est que les entités se situant aux niveaux les plus bas de la hiérarchie héritent des propriétés des entités supérieures auxquelles elles sont rattachées .

Par exemple cet héritage permet d'éviter la création d'un arc Roue/R25 .

Les réseaux sémantiques peuvent être représentés sur machine par des relations de la forme :

RELATION (a,b,c,...)

où a,b,c se sont des concepts .

Les réseaux sémantiques ont été utilisés dans plusieurs applications système expert, notamment dans le système Prospector en géologie .

Ils ont le gros avantage de clarté, de la lisibilité et de la facilité d'écriture .

L'inconvénient que présente ce mode de représentation est que le temps nécessaire pour parcourir les graphes est long, ce qui alourdit le processus de recherche et donc de la résolution des problèmes.

#### II.2.3 REPRESENTATION ORIENTEE OBJET

Cette représentation est un formalisme objet, elle a été proposée pour faire face aux inconvénients des deux précédentes.

Un objet représente à la fois un savoir déclaratif (base de données locale) et un savoir procédural (Programmes).

Ce mode de représentation peut être considéré comme une extension des réseaux sémantiques, extension incorporant des connaissances procédurales .

Un objet contient un certain nombre d'attributs qui sont les noms des propriétés caractérisant l'objet.

Le terme d'objet structuré recouvre des appellations diverses : Frame, schéma, acteur, prototype, entité , etc...

EXEMPLE

FRAME : MAISON

<u>Attribut</u>	<u>Facettes</u>	<u>Description</u>
Situation	{ Valeur Type	10, Rue Pasteur Chaine de caractère .
Faille	{ Valeur Si-modif.	30 Procédure
Composition	Valeur	4
Propriétaire	Valeur	MALIK
Etat	{ Valeur Domaine Si besoin	Bon Bon, moyen, mauvais Règles SI...ALORS...

La maison est caractérisée par l'endroit où elle est située (Situation), sa taille en m<sup>2</sup> (Taille) , le nombre de pièces qu'elle possède (Composition), le nom de son propriétaire (Propriétaire) et son état général (Etat) .

Ces caractéristiques sont représentées par des attributs de l'objet, chacun des attributs possède ici une facette valeur qui est quelque fois précisée grâce à une facette domaine, type ou défaut.

Taille possède une facette si-modif .



Toute tentative de modifier la taille de la maison va déclencher une procédure qui va demander à l'objet "Permis de construire", si une modification de la maison est autorisée. Si la réponse est négative, elle va avertir l'utilisateur.

L'avantage de la représentation orientée objet par rapport aux réseaux sémantiques est l'intégration des traitements procéduraux dans la description d'objets .

- CHAPITRE III -  
LES STRUCTURES DE CONTROLE  
DANS  
LES SYSTEMES EXPERTS

## CHAPITRE III

### LES STRUCTURES DE CONTROLE DANS LES SYSTEMES EXPERTS

#### III.1 INTRODUCTION

Le moteur d'inférences est le coeur des S.E. C'est lui qui, alimenté par la base de connaissances, construit dynamiquement le raisonnement, décidant quelles règles à déclencher et dans quel ordre .

Le cycle de base d'un moteur d'inférence "cycle de travail enchainés pour aboutir au résultat" comprend quatre phases :

- Phase de sélection, d'un sous ensemble de la base de faits et de la base de règles qui mérite plus d'attention que le reste de la base .
- Phase de filtrage : Le moteur d'inférence compare la partie prémisses des règles sélectionnées avec les faits de la base de faits pour déterminer l'ensemble des règles applicables .
- Phase de résolution de conflits (ou choix): Le résultat de cette phase est le choix de la règle qui va être appliquée effectivement.
- Phase d'exécution : Consiste à appliquer la règle choisie, cette action consiste à ajouter un ou plusieurs faits à la base de faits .

L'arrêt de ce cycle dépend du mode de raisonnement utilisé :

- Le chaînage avant, dirigé par les données .
- Le chaînage arrière, dirigé par le but .
- Le chaînage mixte .

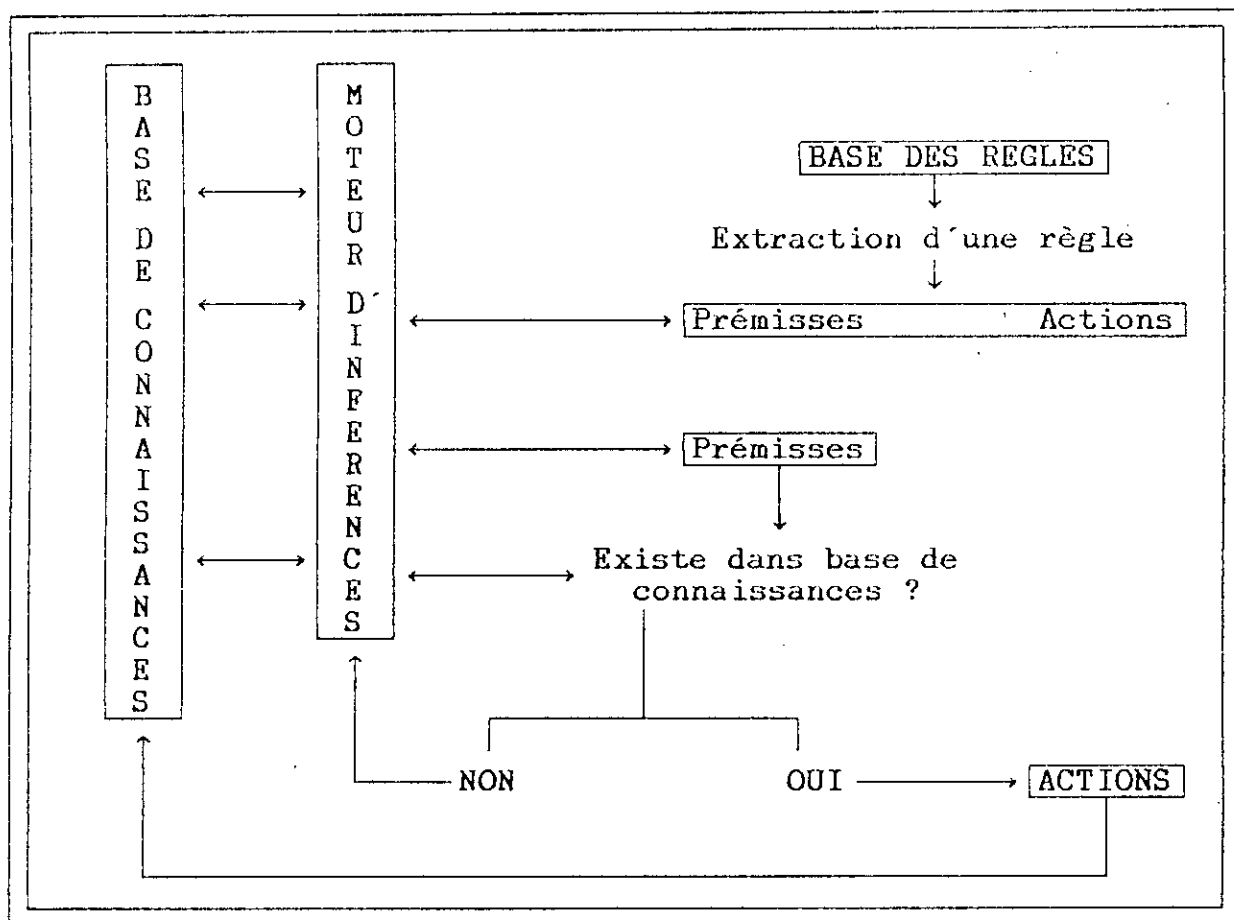
#### III.2 CHAINAGE AVANT

le moteur d'inférences part des faits pour arriver au but, il ne sélectionne que les règles dont les conditions de la partie gauche sont vérifiées -phase de selection de filtrage -

La phase de choix est alors appliquée sur cet ensemble de règles, pour déterminer la règle à utiliser en priorité.

L'application de cette règle entraîne en général une mise à jour de la base de faits-phase d'exécution.

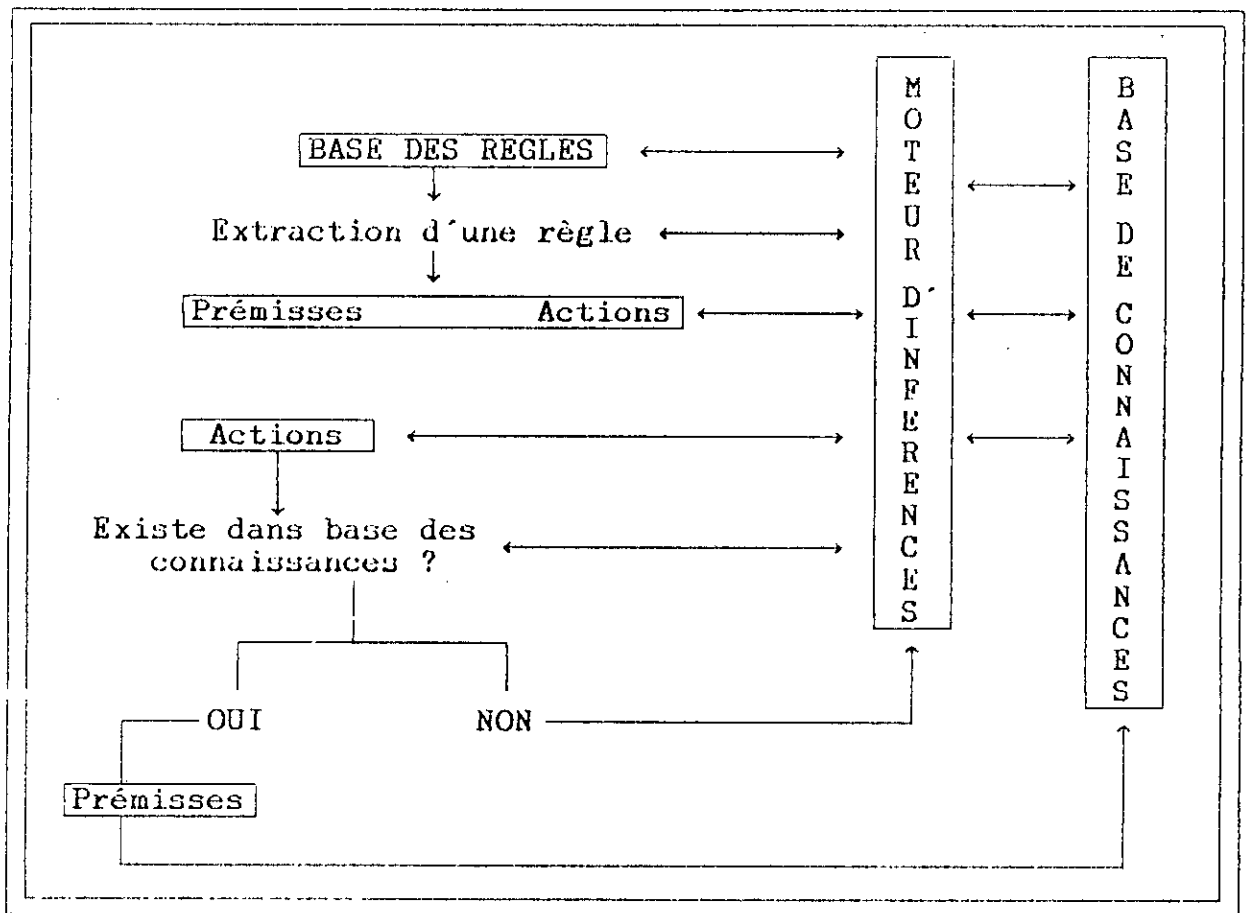
Ce processus est réitéré jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de règles applicable ou que le but soit atteint.



### III.3 CHAINAGE ARRIERE

Le moteur d'inférences part du but, qu'il devra prouver, il examine la partie ensemble d'actions de chaque règle et vérifie si elle est présente dans la base de connaissances ou non, si elle est présente, l'ensemble des prémisses est ajouté à la base de connaissances.

Le processus de déduction ne s'arrêtera que lorsque tous les buts sont atteints ou qu'il n'y'a plus de règles applicables.



### III.4 CHAINAGE MIXTE (Raisonnement mixte)

C'est une combinaison des deux raisonnements, chainage avant et chainage arrière. Dans ce cas, les règles font appel simultanément en partie prémisses à des faits établis (avant) et d'autres à établir (arrière).

### III.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE CHAINAGE AVANT ET CHAINAGE ARRIERE

- Avantages du chainage avant :

- \* Il permet une formalisation naturelle des connaissances.
- \* En général il y'a un enrichissement de la base des faits avec les nouveaux faits déduits.

- Avantages du chainage arrière :

- \* C'est un mode de raisonnement qui semble naturel, puisque seules les règles qui participent à la démonstration du but sont prises en compte.
- \* Il essaye de cerner le but au maximum.

- Inconvénients des deux chainages :

- \* Le moteur d'inférences risque de tomber dans une boucle lors de la recherche des règles qu'il va appliquer.

Exemple :

SI a ALORS b  
SI b ALORS c  
SI c ALORS a

- \* En chainage avant il y'a le risque de la non-focalisation du but, autrement dit la déduction de faits non intéressants.

En ce qui concerne le choix entre chainage avant et arrière, on peut dire qu'aucune stratégie n'est bonne pour tout problème.

EXEMPLES DE SYSTEMES EXPERTS EXISTANTS DANS LE DOMAINE  
GENIE-CIVIL

1. En géotechnique :

\* CONE: S.E pour l'interprétation des résultats donnés par le cône du pénétromètre.

Lorsque le cône du pénétromètre est enfoncé dans le sol, les signaux électriques enregistrés fournissent des données brutes sur la résistance, le frottement, et la pression interstitielle. Ces données sont utilisées par les experts pour déduire la stratigraphie des sols et les paramètres de chaque couche du sol. CONE a été développé par Peter W. Mullarkey de l'université de Camegie-Mellon ( MUL 85 ).

Le mode de représentation des connaissances est celui des règles de production.

On peut citer en outre:

\* RETWALL : Pour la conception des murs de soutènement. Développé par l'université de Sydney, Australia, 1985 ( HUT 85 ).

\* SOILCON : Pour l'analyse de l'état des sols. Développé par l'université de Texas ( WHA 86 ).

\* SITECHAR : Pour la caractérisation des sites géotechniques. Développé par l'université de Camegie- Mellon ( NOR 85 ) .

2. Analyse des structures :

\* Système expert pour l'analyse du risque sismique :

Il modelise les facteurs de jugement et les règles heuristiques des experts dans les mouvements des sols, la vulnérabilité des structures et l'impact social d'un dégât éventuel.

Le résultat est un mécanisme qui peut être utilisé pour une évaluation préliminaire du risque sismique sur les structures existantes.

Ce système est une partie d'un grand projet réalisé par l'université de Stanford ( MIY 86a , MIY 86b ) .

DEUXIEME PARTIE

- L'EXPERTISE -

- ETUDE THEORIQUE SUR LA STABILITE -

- DES TALUS -



## 1. Introduction

L'instabilité des talus est une notion générale se référant à l'enclin du talus de subir un degré particulier, ou une fréquence, de mouvement de masse .

En terme de la géomorphologie, l'instabilité est considérée comme un mécanisme de développement de la forme de la terre .

Dans le contexte social, l'instabilité des talus peut être définie comme le degré ou la fréquence de l'activité du mouvement de masse qui présente des problèmes à l'activité humaine.

L'estimation de la stabilité des sols sur lesquels on doit bâtir, est l'un des plus grands problèmes auquel l'ingénieur de génie civil est constamment confronté .

Sous une surface libre en pente, les contraintes de cisaillement sollicitent la masse de sol. Le sol est stable si ces contraintes sont équilibrées par la résistance au cisaillement .

L'expérience a montré qu'il y'a plusieurs aspects, d'analyse de stabilité, qui mènent souvent à des ruptures.

parmi ces aspects on cite :

1. Investigation insuffisante pour :
  - a. Définir les matériaux présents .
  - b. Localiser les discontinuités qui peuvent contrôler la stabilité.
2. La mauvaise compréhension des courbes " contraintes-déformations " aux grandes déformations, menant à un choix inexact de la résistance au cisaillement .

## 2. Notion du facteur de sécurité

Le facteur de sécurité communément utilisé dans l'analyse de stabilité est seulement un indice du degré de stabilité d'un talus sous certaines conditions limitées .

On ne peut juger le sens vrai ou réel de n'importe quel facteur de sécurité donné, à moins que des détails précis sur les

hypothèses faites pour l'analyse, sont donnés .

De nombreuses publications ont été faites sur les divers coefficients de sécurité que l'on peut adopter pour estimer la stabilité des talus .

Ces coefficients prennent la valeur 1 pour un talus en état d'équilibre limite (rupture). La définition utilisée pour le facteur de sécurité est la suivante : ( POU 79 ) .

Facteur de sécurité =  $\frac{\text{La somme des résistances au cisaillement pour des conditions de chargement données}}{\text{Somme des contraintes de cisaillement le long de la surface de rupture}}$

$$F = \frac{\tau_{\text{résistante}}}{\tau_{\text{appliquée}}}$$

Ce travail vise à établir une technique de sélection de la résistance au cisaillement (c'est à dire le numérateur de l'équation du facteur de sécurité) .

Dans les notions de la stabilité des pentes, le comportement des sols affecte sensiblement le choix de la résistance au cisaillement utilisée pour l'analyse .

### 3. Résistance au cisaillement d'un sol

La plus importante propriété d'un sol qui se rapporte aux mouvements de masse est la résistance au cisaillement .

Cependant pour mieux comprendre les comportements du sol vis à vis du cisaillement, il est important d'avoir une appréciation sur les effets de l'histoire des contraintes et de savoir si le sol se dilate ( augmente en volume ), ou se comprime durant le cisaillement drainé .

La dilatation ou la compression lors du cisaillement se traduit par une tendance à la dilatation ou une tendance à la compression lors d'un chargement non-drainé .

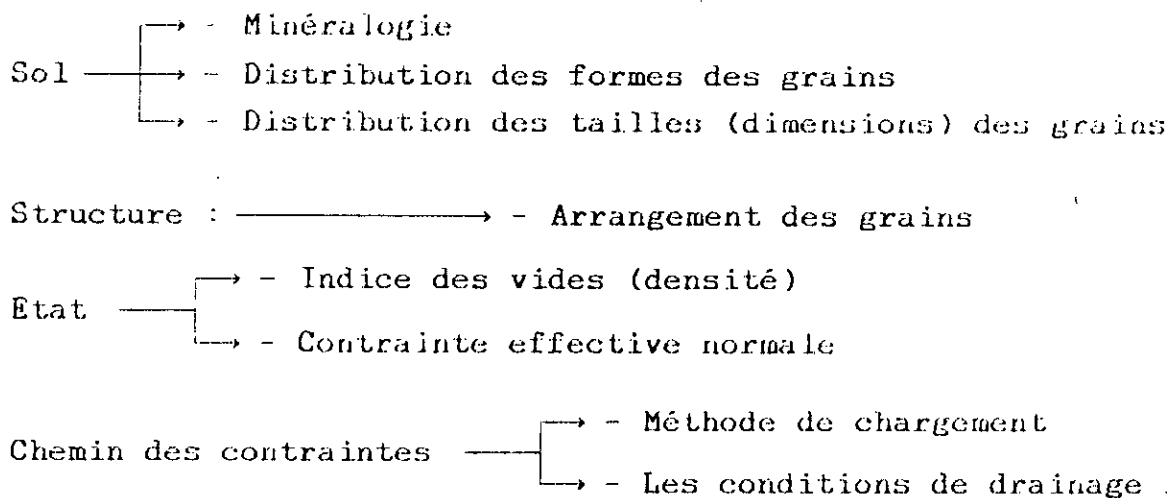
En outre, les caractéristiques générales du sol ( teneur en eau, plasticité, l'activité ) au site considéré, affectent énormément la stabilité.

Les résistances au cisaillement qui peuvent être mobilisées le long d'une surface à potentiel de rupture, dépend essentiellement de (03) trois facteurs :

1. L'intensité de la contrainte normale effective  $\bar{\sigma}$  Le long de la surface considérée .
  2. Les propriétés des matériaux composant le sol.
  3. Changement du volume que la masse du sol peut subir lors du cisaillement .
4. Facteurs contrôlant les courbes contrainte-déformation d'un sol :

Pour choisir la résistance au cisaillement, lors d'une analyse de stabilité, d'une manière raisonnable, il est important de comprendre clairement et complètement les facteurs majeurs contrôlant la résistance au cisaillement et la déformation, c'est à dire les courbes contrainte-déformation des sols .

Ces facteurs sont : ( POU 79 )



a. Le sol :

Il est le premier facteur à prendre en compte. La minéralogie d'un sol qui peut être de type massif (Quartz, feldspath...) ou de type argileux (Attapulгите, Montmorillonite...) gère à un large degré les valeurs numériques de l'angle de frottement interne et des déformations .

D'une manière générale, il a été trouvé que la forme et les dimensions des particules ont des influences importantes sur l'allure des courbes contrainte-déformation .

Ainsi une partie de la phase d'exploitation de l'analyse de stabilité comprend une description attentive de tous les sols présents .

Ces descriptions peuvent comprendre la forme des grains, leurs dimensions, ainsi que les indices de propriétés qui reflètent la minéralogie (par exemple: la plasticité, l'activité).

Ces résultats sont illustrés dans le tableau suivant pour confirmer ce qui a été mentionné ci-dessus ( KEN 87 ).

Minéral	Diametre d Epaisseur t	Angle de frottement $\phi_r$
Quartz	d = 0.1 mm	35°
Feldspath	d = 0.01 mm	35°
Kaolinite	d = 0.3 ÷ 3 $\mu\text{m}$ t = 1/3 à 1/10 d	12° ÷ 25°
Montmorillonite	d < 1 $\mu\text{m}$ t = 1/100 d	4° ÷ 10°

TABLEAU II.1 : Propriété de quelques minéraux

b. Structure :

La structure du sol est la seconde importante variable qui affecte les propriétés des courbes contrainte-déformation .

Les particules d'un sol peuvent être arrangées sous plusieurs façons. C'est pour cette raison qu'un même sol peut avoir des structures différentes dépendant de la manière dont il a été formé, déposé ou compacté .

La structure affecte la déformation correspondante à la résistance maximale et le module de déformation ( HIR 63 ) .

Cependant, elle n'affecte pas la résistance aux grandes déformations, Car aux grandes déformations la structure originale est entièrement détruite (rompue) .

Toute fois le rapport de la résistance maximale à la résistance aux grandes déformations dépend de la structure, et influe sur le choix de la résistance au cisaillement pour l'analyse de stabilité.

Jusqu'à présent la structure d'un sol n'est pas facilement mesurable, ainsi on utilise souvent des termes tels que : remanié ou non remanié pour distinguer les diverses structures.

Quoi qu'il est difficile de quantifier cette structure, n'importe quelle information disponible relative à cette dernière est importante pour une bonne description des sols. La disponibilité de cette information permet une meilleure interprétation des résultats.

c. Etat :

L'état d'un sol est défini par deux paramètres connus qui sont, la densité (Indice des vides) et les contraintes effectives. La modification de l'indice des vides et/ou des contraintes effectives engendre des changements dans la structure. Par conséquent la structure et l'état ne sont pas des paramètres entièrement indépendants.

Le comportement contrainte-déformation varie en fonction de la densité du sol et de l'effet des contraintes effectives.

Par exemple, une augmentation de contraintes effectives résulte en un accroissement du module de déformation. Egalement, l'observation expérimentale a montré que la déformation correspondante à la résistance maximale augmente avec l'accroissement de la contrainte de confinement.

Il n'est pas possible de faire des comptes rendus généraux à propos des effets pareils. Plutôt il faut se rappeler que la densité initiale et les contraintes effectives, c'est à dire l'ETAT, ont une importante influence sur le comportement contrainte-déformation .

#### d. Chemin de contrainte :

La forme de la courbe contrainte-déformation dépend du chemin des contraintes. La méthode de chargement utilisée pour estimer la résistance au cisaillement à utiliser dans l'analyse de stabilité, doit simuler au mieux les conditions in-situ.

Plusieurs types d'essais de laboratoire existent. On cite :

- ESSAI triaxial.
- ESSAI de cisaillement simple.
- ESSAI de cisaillement direct.

Ces tests conventionnels n'estiment généralement pas le comportement des courbes cte-déf en grande déformations. Dans l'essai triaxial par exemple on ne peut pas dépasser les 20% de déformation. Pour cette raison d'autres types d'essais sont recommandés, en particulier :

#### L'ESSAI DE CISAILLEMENT ROTATIONNEL

Sous des conditions idéales l'essai de laboratoire choisi pour mesurer les propriétés des courbes contrainte-déformation doit pouvoir simuler au mieux le chemin des contraintes suivi in-situ.



a. Sable lache :

Les courbes (1) ci-dessus sont représentatives de l'essai de compression triaxiale sur l'échantillon du sable très lache.

La contrainte de cisaillement  $\tau_{45}$  croit graduellement en fonction de la déformation, jusqu'à ce que le maximum soit atteint au point  $S_c$ .

Au delà de la déformation correspondante au point  $S_c$ , la contrainte de cisaillement est constante.

L'échantillon étant contractif à mesure que la contrainte de cisaillement est appliquée, le volume diminue de façon continue jusqu'à atteindre une valeur d'indice des vides qui restera constante pour les grandes déformations. Au point  $S_c$  le sol a atteint le régime permanent.

- Le module initial tangent diminue à mesure que l'indice des vides  $e_c$  (après consolidation) augmente.
- Le module initial tangent diminue avec la diminution de la pression de consolidation ( $\sigma_c$ ).
- La déformation nécessaire pour atteindre le régime permanent augmente à mesure que l'indice des vides augmente (après consolidation) et à mesure que la pression de consolidation diminue.

Ces échantillons sont entièrement contractifs.

b. Sable dense :

L'échantillon (2) consolidé au point ( $c_d$ ) situé au dessous de la courbe d'état se contracte légèrement au début du test (cisaillement).

A mesure que la déformation devienne suffisamment large l'échantillon se dilate jusqu'à ce que l'indice des vides correspondant au régime permanent soit atteint. La courbe contrainte-déformation pour l'échantillon possède un Pic au point (m).

Le rapport  $\tau_m/\tau_s$  représente la sensibilité. Où  $\tau_m$  et  $\tau_s$  représentent respectivement les résistances au pic et résiduelle.



SKEMPTON et NORTHEY (BEN 87) ont fait une classification des argiles sensibles comme il est indiqué dans le tableau suivant :

Sensitivité	Classification
1	Argiles insensitives
1 - 2	Argiles de faible sensibilité
2 - 4	Argiles de sensibilité moyenne
4 - 8	Argiles sensibles
> 8	Argiles extra sensibles
> 16	Argiles rapides

" Tableau II.2 : Classification des argiles sensibles "

Le chemin des contraintes de l'échantillon est une ligne droite à 45° qui traverse la ligne de résistance en régime permanent (à une déformation plus petite que la déformation au pic.) et atteint le pic en (m) puis revient pour se terminer sur la ligne de résistance en régime permanent .

Pour une série de tests de cisaillement sur des échantillons ayant le même indice des vides que l'échantillon (2) mais à différentes pressions effectives de consolidation, les chemins des contraintes atteignent des sommets (m) et changent de direction pour finir sur la ligne de résistance en régime permanent .

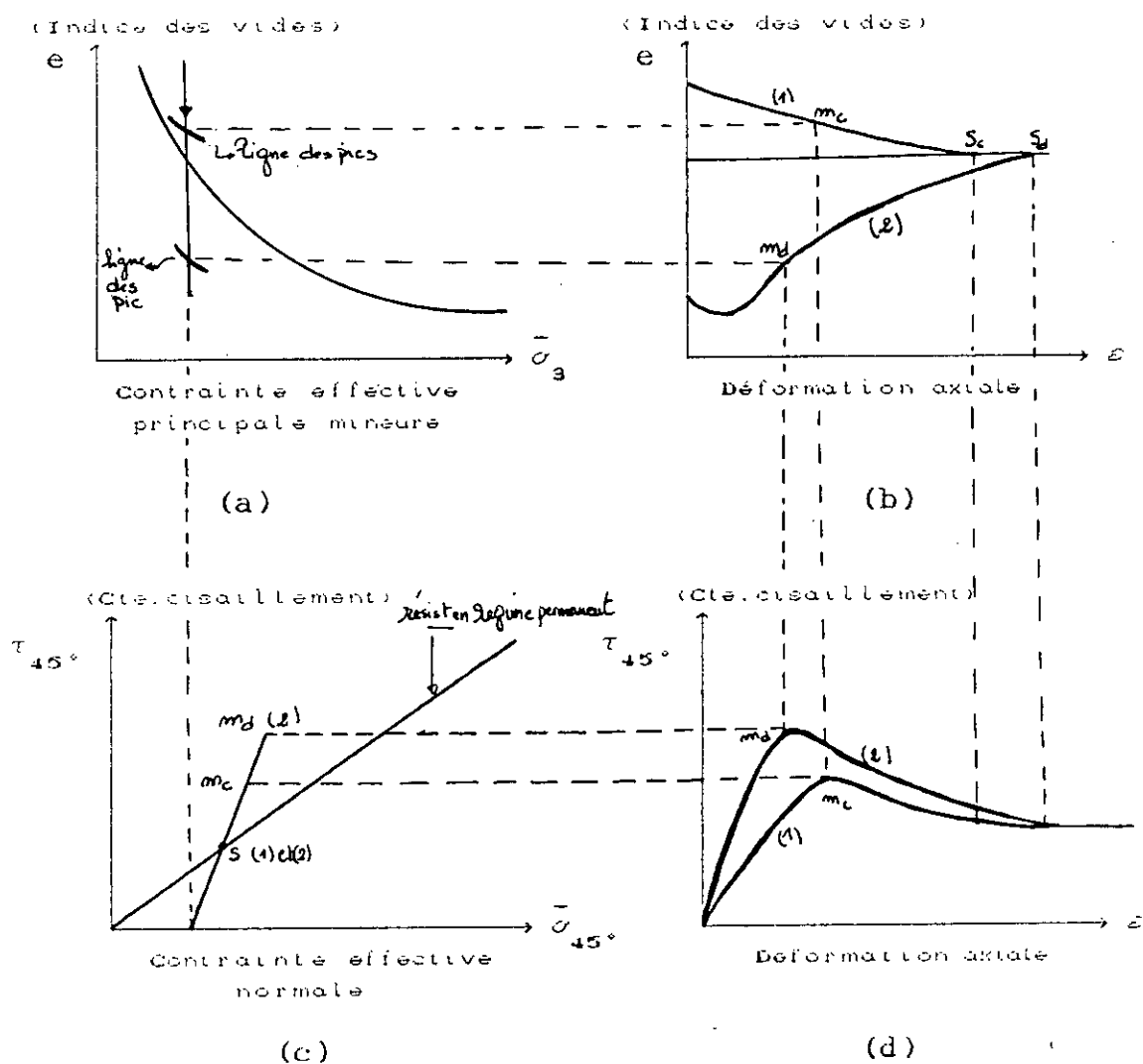
L'ensemble des sommets formera la courbe enveloppe des résistances maximales, cette enveloppe doit nécessairement être une courbe non linéaire car :

- A une pression de confinement nulle  $\sigma_3 = 0$  un sol non cohésif ne possède pas de résistance, l'enveloppe des Pics passe par l'origine .
- A des pressions de confinement très élevées l'état initial de l'échantillon sera au dessus de la courbe

d'état et par conséquent il n'y aura pas de développement du Pic et l'enveloppe des Pics doit se confondre avec la ligne de résistance en régime permanent.

L'enveloppe des résistances maximales est non linéaire et non unique.

**B. SOLS NON COHÉSIES AVEC UNE PROPORTION SUBSTANTIELLE DE GRAINS PLATS**



Le comportement idéal des sols à grains ronds doit-être modifié pour le cas des sols contenant une grande quantité de grains plats.

Pour les sols à forte proportion de grains plats, à mesure que la déformation ait lieu, les grains ont tendance à s'orienter dans la direction du mouvement ( SKE 64 ) résultant en une diminution de la contrainte de cisaillement mobilisée .

a. Sol contractif/lache :

L'échantillon (1) dont l'état initial se situe au dessus de la courbe d'état est contractif .

La courbe contrainte-déformation possède un Pic quoique le volume décroît rapidement. Dans ce cas le Pic n'est pas le résultat de la dilatation, il est dû à la perte de résistance qui en résulte de l'orientation des particules dans la zone de rupture .

La déformation axiale nécessaire pour le développement du Pic est très grande car un mouvement substantiel entre grains est nécessaire pour engendrer une telle orientation .

Quoi que l'indice des vides décroît après le Pic, pour lequel un gain de résistance est attendu, l'efficacité de la structure orientée est telle qu'une perte de résistance est observée .

Si le sol contenait une grande proportion de grains ronds l'effet net serait tel qu'il n'y aura pas de perte de résistance à mesure qu'on se rapproche du régime permanent .

b. Sol dilatif/dense :

L'échantillon (2) est préparé à un état situé au-dessous de la ligne du régime permanent et à une contrainte effective identique à l'échantillon (1).

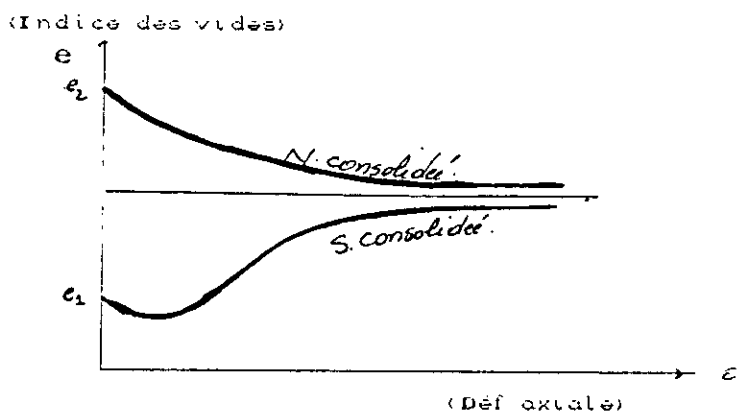
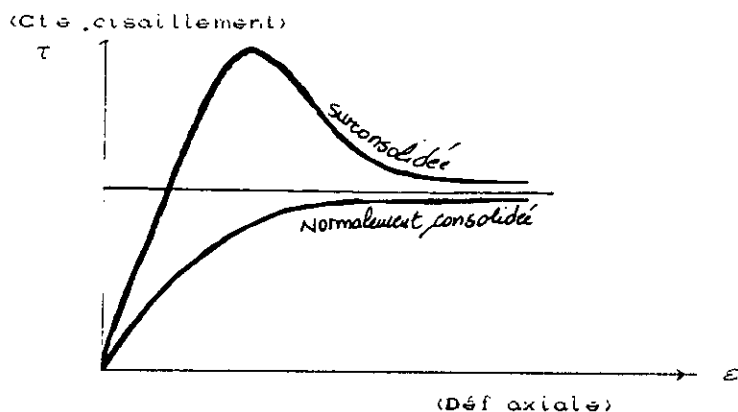
Dans ce cas l'échantillon se contracte légèrement puis se dilate avec la déformation jusqu'à ce que le régime permanent soit atteint . La déformation nécessaire pour atteindre le régime permanent est très grande ( à cause de la forme des grains ).

Le Pic sur la courbe contrainte-déformation correspond probablement à la vitesse maximale de dilatation ( car les déformations nécessaires pour atteindre le Pic dans un échantillon hautement dilatatif ne sont pas suffisantes pour engendrer une importante orientation des grains .

Si des séries d'échantillons ont été préparées à des états se trouvant sur la courbe de gonflement, une ligne des Pics pour ces échantillons dilatatifs pourra-être définie. A cette ligne des Pics correspondra une enveloppe de résistance à Pic passant par le point (m) .

c. Sols cohésifs :

\* Argile normalement consolidée et surconsolidée :



Les résultats des essais de compression axiale réalisés dans une cellule triaxiale, pour des échantillons de sables et d'argiles permettant de conclure que :

- Les sols argileux ont deux résistances au cisaillement généralement plus faibles que celles des sables .
- Un sol argileux normalement consolidé peut ne pas présenter de pic .
- La courbe contrainte-déformation d'un sol argileux fortement surconsolidé présentera un pic (c'est à dire une chute de résistance post-pic).

Cette perte de résistance peut être expliquée par le fait qu'au grande déformation, les particules sont orientées dans un plan donné : C'est à dire que les particules qui sont initialement disposées au hasard s'orientent parallèlement les unes aux autres dans la direction du mouvement . La résistance obtenue au grande déformation est appelée résistance résiduelle .

### CONCLUSION

Le critère de rupture de Mohr-Coulomb considère que l'enveloppe des résistances est une ligne droite. Implicitement on admet que cette enveloppe est unique.

Dans ce chapitre, il a été montré que l'enveloppe n'est ni linéaire, ni unique .

Par conséquent, la valeur de la résistance au cisaillement qu'il faut choisir en vue de dimensionner un ouvrage donné doit être justifié par une explication du comportement du sol et du chemin probable des contraintes suivi in-situ .

Souvent, le choix de la contrainte " admissible " est le résultat d'un jugement pour aboutir à une bonne estimation de celle-ci .

De ce fait, on est ramené à envisager une approche (S.E) basée sur les heuristiques des experts fondées sur leur expérience et leur jugement .

-TROISIEME PARITE-

- CONCEPTION DU SYSTEME EXPERT -

- SERCIS -

## INTRODUCTION :

Bien qu'il a été supposé que les méthodes d'analyse de stabilité sont bien développées la responsabilité reste dans le camp de l'analyste pour entamer une bonne analyse.

Dans le contexte de l'analyse de stabilité, "Une bonne solution" est celle qui rend logiquement les facteurs de sécurité égaux à l'unité (1) lorsqu'elle est effectuée pour des séries de ruptures de talus.

Il faut alors se demander qu'elle doit être l'attitude de l'analyste ou du projeteur devant un problème donné ?, quelle valeur de la résistance au cisaillement doit il choisir pour mener une étude de stabilité?

La réponse à de telles questions n'est pas du tout facile, et elle ne peut être formulée qu'en s'appuyant sur les connaissances des géotechniciens basées sur leurs expériences.

POULOS confirme ceci en disant que les expériences passées seules constituent une base suffisante sur laquelle on juge la stabilité (POU 79).

## 2. UTILITE D'UN SYSTEME EXPERT:

Confronté à un problème de stabilité d'un talus, l'analyste doit prendre une décision pour un choix exact de la résistance au cisaillement et doit juger si la résistance au pic, la résistance résiduelle ou toute autre valeur entre les deux doit être sélectionnée.

Cette décision est fortement liée à la compréhension complète du comportement du sol vis à vis du cisaillement. En outre, il est vital de connaître: s'il va y avoir une chute de résistance aux larges déformations, la magnitude de cette chute et les déformations au pic et résiduelle.

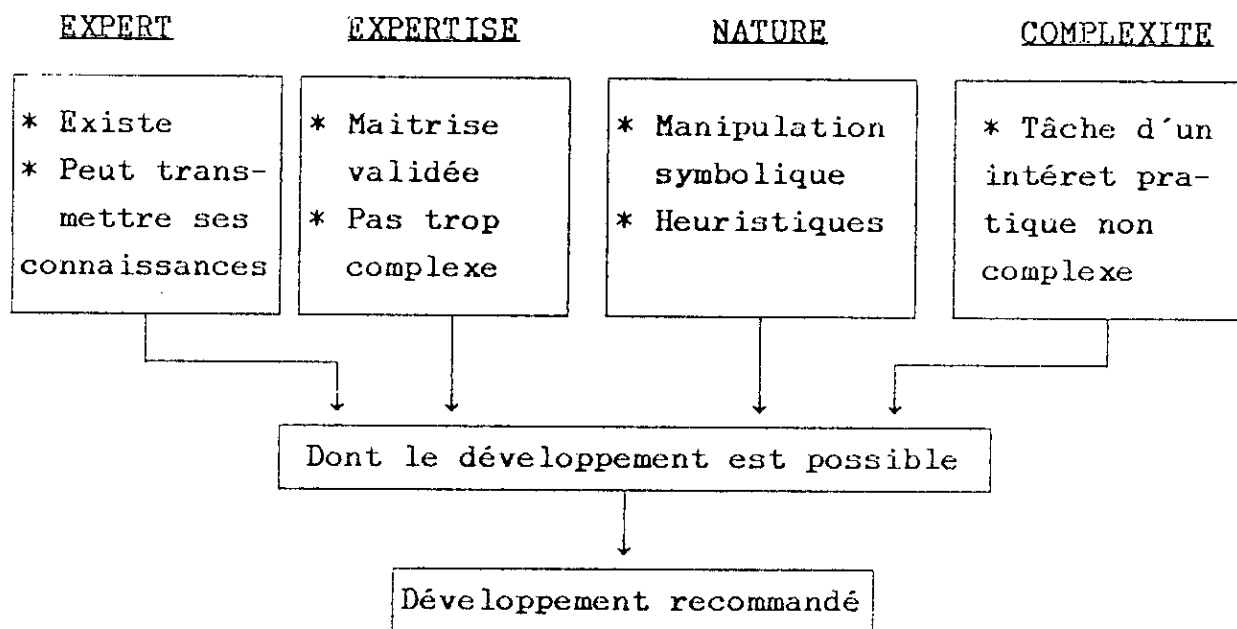
On s'aperçoit qu'il n'existe pas de théories systématiques sur la rupture des talus et sur la résistance au cisaillement, d'où l'impossibilité d'envisager un algorithme procédural qui traite ce problème avec succès.

Par contre, une solution système expert (S.E) peut être envisagée en se fondant sur les heuristiques basées sur l'expérience des géotechniciens. Ces dernières sont issues essentiellement de la description de cas de ruptures connues. On peut citer ici les cas donnés par POULOS ( POU 79) qui seront envisagés dans l'annexe (A).

L'essentiel du raisonnement de l'expert s'appuie sur l'analogie avec les cas connus lorsqu'ils sont similaires; ou bien il essaye de se ramener à un cas proche, il utilise en plus toutes ses connaissances et son expertise pour adopter parfois des solutions dérivées de celles des cas décrits.

Donc, on s'aperçoit qu'une solution S.E est à envisager étant donné qu'il n'y'a pas de théorie bien spécifique du domaine étudié et vu la possibilité d'enrichir la base de connaissances s'il y'a d'autres cas de ruptures qui vont se produire. ( c'est une évolution de connaissances dans le temps ).

Nous montrons schématiquement les conditions que nous avons jugé nécessaires pour recommander l'approche ( S.E ).





### 3. ETAPES SUIVIES LORS DE LA CONCEPTION DU SYSTEME

#### 3.1 Sélection du problème :

Le problème qu'on essaye de traiter et qui consiste à choisir la résistance au cisaillement pour l'analyse de stabilité des talus, a été sélectionné par monsieur BELKACEMI expert géotechnicien et justifié par Mr SILHADI spécialiste informaticien.

Après avoir fixé le but à atteindre, nous avons mené une recherche bibliographique d'expertise décrivant des cas de ruptures subis par une série de talus .

Dans un premier temps, nous avons essayé de synthétiser tous ce qui a une relation avec le problème, après cela, nous avons cherché à déterminer les éléments de base qui influent sur le choix de cette résistance, et à les vérifier auprès de l'expert par le biais d'une discussion en posant des questions très orientés et objectives à ce dernier, ce qui nous a permis de lever des doutes et de compléter les connaissances .

Après une première lecture commentée et discutée avec Mr BELKACEMI, nous avons formulé les connaissances, sous forme de règles, celles-ci ont été réarrangées et modifiées.

La nouvelle version des règles a été contrôlée à nouveau avec monsieur BELKACEMI jusqu'à ce qu'il y ait accord de celui-ci.

Nous avons abouti à une formulation à peu près stable des règles que nous avons jugé valide pour entamer la deuxième étape c'est à dire le développement d'un S.E .

#### 3.2 Développement du système expert prototype

Nous avons commencé par le choix du type de représentation des connaissances acquises. Le mode de représentation qui nous a paru le plus approprié était celui des règles de production, car ces règles qui sont considérées comme des morceaux indépendants de connaissances, que nous avons jugé convenables pour décrire et représenter les connaissances acquises, en plus ce mode permet de comprendre aisément le sens des connaissances.

En outre, le cas qui se présente devant nous, ne montre aucune complexité qui fait appel à une structure orientée objet à mesure qu'on a assisté à un nombre très réduit de concepts avec un peu de paramètres, ce qui a rendu l'introduction des informations pas du tout complexe .

Après le choix du mode de représentation nous avons développé une première implémentation qu'on a testé avec des exemples de cas étudiés .

A partir de cela, nous avons choisi un outil de développement approprié :  $\Sigma$  - log. (G.O.U.87) .

Le moteur d'inférence de  $\Sigma$  - log utilise le chaînage arrière comme mode de raisonnement. Il part du but qui est connu en cherchant les règles qui permettent de conclure sur ce but, puis il le remplace (le but) par une conjonction de sous buts, et ainsi de suite jusqu'à ce que le but initial soit établi .

Une fois le système prototype est développé nous sommes passés à l'étape de développement de la B.C et la mise au point du système .

### 3.3 Développement de la base de connaissances (B.C) et mise au point du système :

Dans cette étape nous avons procédé au remplissage de la base de connaissances et l'implémentation totale du système.

### 3.4 Evaluation du système :

Le système ainsi réalisé a été testé par l'expert du domaine en l'essayant par plusieurs cas d'exemples afin de vérifier la cohérence des résultats rendus par le système et de valider définitivement la B.C .

#### 4. L'acquisition des connaissances :

La prise de l'expertise, ou encore l'acquisition des connaissances, est le point d'entrée de la phase de réalisation d'un prototype système expert (GRO 88) .

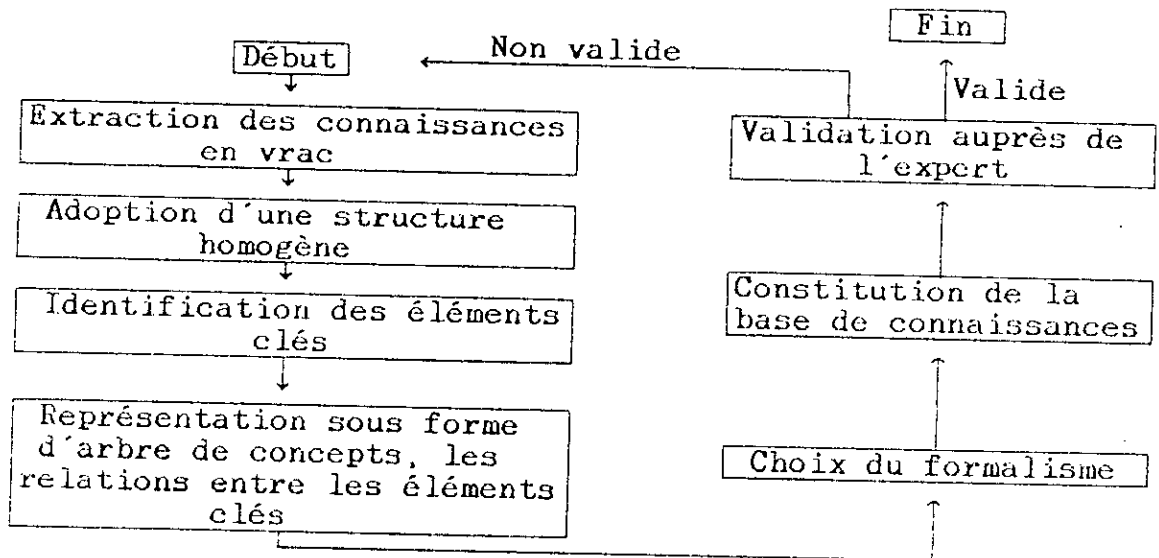
En effet, il faut "extraire" la connaissance de l'expert, pour la faire transformer sous une certaine forme dans la base de connaissances (B.C) .

Les méthodes utilisées pour l'extraction de connaissances sont variées. On peut citer : L'entretien, l'observation, l'analyse, le questionnaire, etc...

Ce processus d'acquisition est souvent guidé par un spécialiste de la connaissance, connu sous le nom "Cogniticien" qui fait parler l'expert le plus librement possible en lui posant des questions bien pointuées sur la connaissance cherchée.

Cette connaissance peut être extraite auprès d'un expert (ou plusieurs) ou bien tirée des travaux de recherches et des livres. Mais le but est le même : Pouvoir transférer l'expertise dans la B.C .

On peut schématiser le processus d'extraction des connaissances par la figure suivante .



PROCESSUS D'EXTRACTION DE CONNAISSANCES

Nous avons utilisé deux sources d'extraction des connaissances: A partir des travaux de recherche publiés par des géotechniciens spécialisés reconnus mondialement pour leur efficacité entant que chercheurs et bons auteurs, en occurrence:

Mr POULOS, S.J (U.S.A) (POU 79), Mr SKEMPTON, A.W (ANG.) (SKE 64) et Mr BJERRUM, L (NORVEGE) (BJE 67) .

De même on a pu enrichir ces connaissances auprès de Mr BELKACEMI, S. expert géotechnicien qui a assuré de même la validation des connaissances.

L'extraction de ces connaissances a été conduite par Mr SILHADI, K. spécialiste informaticien avec lequel nous avons joué le rôle des cogniticiens.

Les études faites par les auteurs cités précédemment ont montré que de bons résultats peuvent être obtenus seulement à partir d'un programme attentif et intégré de travail de site, d'investigation en laboratoire et d'analyse . Cependant l'expérience et le jugement restent toujours nécessaire (GRA 87), même dans les cas les plus favorables (des essais effectués par des opérateurs compétents et qualifiés, des appareils d'essais en bon état ...etc).

En effet, un jugement basé sur l'expérience acquise est demandé pour le choix de la résistance au cisaillement utilisée pour l'analyse de stabilité. En s'appuyant sur cette idée on a essayé d'extraire les règles et de les modéliser.

Dans un premier temps, nous avons dégagé les paramètres clés qui affectent la courbe cte-déf. Ces paramètres concernent la nature du sol, sa structure, son état et le chemin des contraintes suivi pour modéliser les conditions in-situ.

Dans un deuxième temps, nous avons essayé de découvrir les concepts qui sont de deux types :

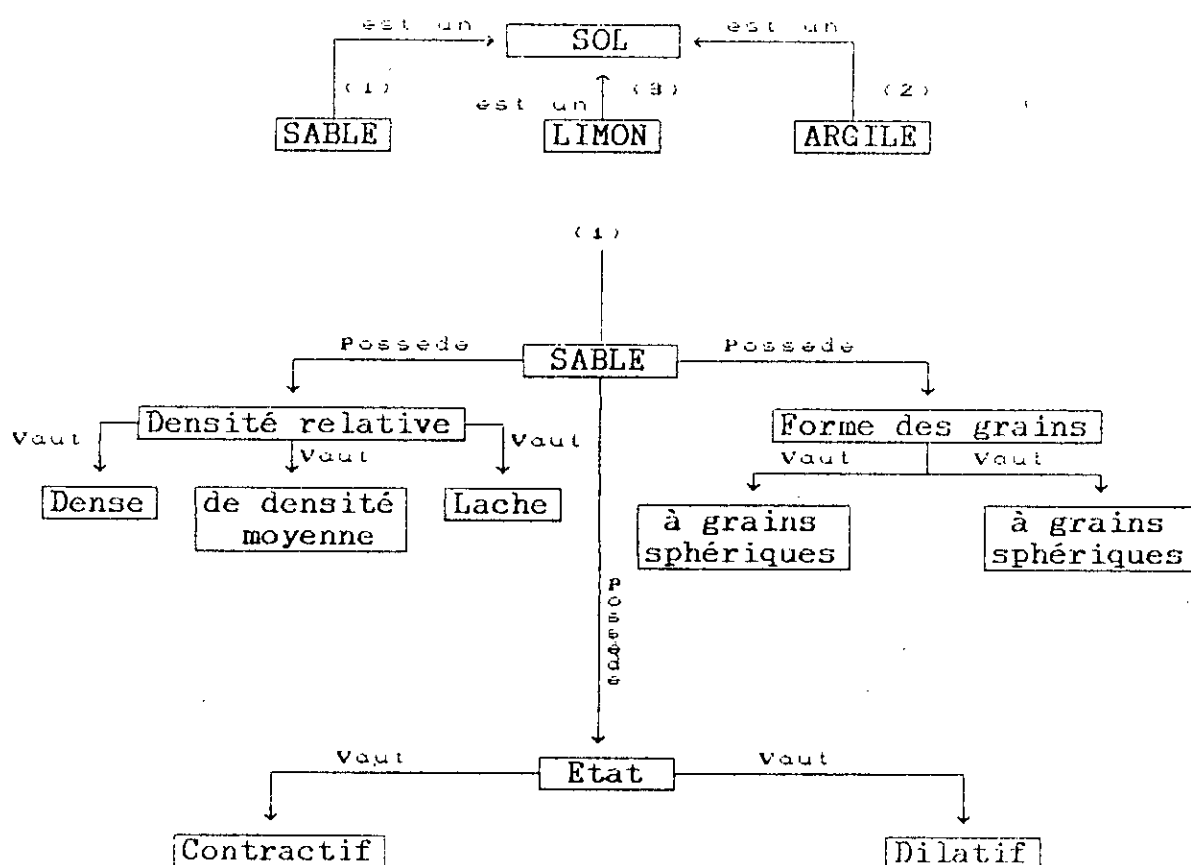
1. Des concepts ayant relation avec les paramètres clés tel que : L'état géotechnique qui lie la courbe d'état à l'état du sol. Il s'éclate en paramètres (couple d'état) et en concepts (courbe d'état).

2. Des concepts isolés assurant la relation entre d'autres paramètres tel que le concept sensibilité.

Dans un troisième temps nous avons cherché les effets de chacun des paramètres clés sur la forme de la courbe cte-déf.

Enfin, on a pu représenté les relations entre les différents paramètres sous forme de branches d'arborescence:

Exemple :



## 5. Σlog : OUTIL DE DEVELOPPEMENT DU SYSTEME - SERCIS -

L'efficacité d'un système expert dépend surtout de la qualité des connaissances et de la justesse des décisions que le système va donner, de ce fait un système expert n'est pas seulement un moteur d'inférence mais aussi les connaissances dont il dispose.

Comprendre et interpréter les résultats que donnent le système, ne sont pas du rôle du moteur d'inférence, mais ces fonctions (comprendre et interpréter) sont effectuées par des logiciels facilitant l'utilisation du système par un non informaticien.

Pour notre système -SERCIS- et pour gagner du temps dans le développement du système, nous avons utilisé le logiciel Σlog (G.O.U 87) qui a été créé par Monsieur F.L GOURDET au sein du laboratoire METHODES de l'INSA de LYON .

Σlog constitue une interface facilitant la mise au point de systèmes experts et privilégiant l'expression d'unités de savoir faire dans un langage proche du naturel.

Les faits, les règles qui s'y trouvent acceptés restent liés pour des raisons d'efficacité au modèle logique du calcul des prédicats du premier ordre.

Nous donnons dans ce qui suit une présentation de Σ Log

### 5.1 Présentation de Σ log

Dans son secteur pédagogique, Σ log offre plusieurs options dont nous citons les plus importantes et que nous voyons utiles pour le développement du système :

\* Dialogue: d Le dialogue s'ouvre depuis le menu principal au moyen de la touche < d >

Exemple : En plaçant les faits suivants :

w1 vaut 35.

ip vaut 19.

ocr vaut 1.9.

En passant en mode dialogue, on pose une ou (des) question (s) au système par exemple :

Le sol est quoi ?

Réponse

■ QUOI ? argile

■ QUOI ? limon.

\* Exploitation : e

\* Fichier :f donnant une interprétation et codage d'un texte écrit.

\* banque :b chargement d'une banque de base de connaissances.

\* Exposé :e Activation d'une interface de choix. une liste de questions qui a été formulée et introduite dans le même fichier que la base de connaissances, permettant de poser des questions au système.

La liste qui débute par un expos ? et en fini avec expo ? est :

Expo ?

1) utiliser résistance 'qui ?

2) le sol est 'quoi ?

3) état est 'comment ?

4) utiliser essais 'comment ?

5) faire deuxième essai pour atteindre les grandes déformations ?

6) argile est 'comment ?

7) sable est 'comment ?

8) la courbe cte - def présente 'quoi ?

9) la déformation au pic est 'comment ?

0) autre chose ?

Expo ?

\* Lectures :\_l donne un affichage page par page d'un fichier texte à l'écran.

\* Topo\_général : t affichage des connaissances actives en mode interactif ou non avec ou sans traduction prolog. Edition interactive de phrase.

Exemple:

Phrase 43:

w1 vaut 35.

image Prolog:

vaut (w1,35).

phrase 46:

la stabilité est calculé à court

terme

image Prolog

'stabilité'(la,est,'calculé','

court terme).

$\Sigma$  Log offre à l'utilisateur une possibilité de traitement des réponses.

\* Reprise : r Présentation par phrases complètes des réponses en répétant les conclusions autant de fois qu'il existe de chemins logiques y conduisant; affichage final du nombre total de chemins.

Exemple:

argile est 'comment ?

on obtient à la première reprise la sortie

■ argile est surconsolidée

■ 1 réponses

\* Interview: i En introduisant une bae de faits pour résoudre un problème donné, et si  $\Sigma$  log répondra Non! ou j'ignore à une question posée par l'utilisateur, ce dernier passant en mode interview obtiendra des questions posées par le système dont il doit répondre par oui (o) ou non (n).

Exemple:

On pose une question :le sol est quoi ?

Réponse: J'ignore

On passe au mode interview

Interview: il va afficher:



\* Topo\_général : t affichage des connaissances actives en mode interactif ou non avec ou sans traduction prolog. Edition interactive de phrase.

Exemple:

<u>Phrase 43:</u>	<u>phrase 46:</u>
wl vaut 35.	la stabilité est calculé à court
image Prolog:	terme
vaut (wl,35).	image Prolog
	'stabilité'(la,est,'calculé','',
	court terme).

$\Sigma$  Log offre à l'utilisateur une possibilité de traitement des réponses.

\* Reprise : r Présentation par phrases complètes des réponses en répétant les conclusions autant de fois qu'il existe de chemins logiques y conduisant; affichage final du nombre total de chemins.

Exemple:

argile est 'comment ?  
on obtient à la première reprise la sortie  
■ argile est surconsolidée  
■ 1 réponses

\* Interview: i En introduisant une bae de faits pour résoudre un problème donné, et si  $\Sigma$  log répondra Non! ou j'ignore à une question posée par l'utilisateur, ce dernier passant en mode interview obtiendra des questions posées par le système dont il doit répondre par oui (o) ou non (n).

Exemple:

On pose une question :le sol est quoi ?  
Réponse: J'ignore  
On passe au mode interview  
Interview: il va afficher:

```
Si wl vaut ...  
Et SI: ... < 35 est vrai  
Et SI ip vaut ...  
Et SI: ... < 15 est vrai  
ALORS le sol est sable .
```

```
■ wl vaut ...  
  ? ? ?  
■ wl vaut ...?
```

On répond par 32 par exemple  
il va afficher

```
■ : 32 < 35 est vrai  
  ip vaut ...  
  ? ? ?  
  ip vaut ... ?
```

On répond par 12 par exemple  
il affiche sur écran

```
■ : 12 < 15 est vrai  
  le sol est sable  
  autre recherche .../...
```

\* Démonstration\_d : Après le mode interview, l'utilisateur peut avoir une démonstration en tapant la touche <d> pour illustrer ceci nous donnons l'exemple suivant :

Exemple :

Si on cherche une démonstration de l'exemple illustré dans le mode interview

On tape la touche <d> il nous affiche :

```
SI wl vaut ...  
ET SI : ... < 35 est vrai  
ET SI ip vaut ...  
ET SI : ... < 15 est vrai  
ALORS le sol est sable.
```

```
wl vaut 32
:32 < 35 est vrai
ip vaut 12
:12 < 15 est vrai
Le sol est sable.
Autre recherche .../...
```

## 5.2 DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME EXPERIΣLOG :

Dès qu'il s'agira de mettre au point une base de connaissances relativement importante, on adoptera la démarche suivante:

### 1ère étape :

Ecriture de la base de connaissances à l'aide d'un éditeur de texte. Cette base est constituée de phrases modélisant la connaissance spécifique du domaine.

### 2ème étape :

Sous Σlog, une lecture du texte écrit est permise pour corriger d'éventuelles erreurs, puis on fait une analyse syntaxique et une compilation du texte (une traduction binaire conformément au langage prolog de la base de connaissances).

Si on constate qu'il y'a des erreurs on revient à l'éditeur pour faire des corrections si non on introduit une base de faits pour essayer si ça marche ou pas.

## 6. LA STRUCTURE DU SYSTEME - SERCIS -

Le système - SERCIS - comprend comme tout système expert classique, une base de connaissances, une base de faits et un moteur d'inférences.

### 6.1 UNE BASE DE CONNAISSANCES

Ou appelée aussi une base de règles contenant des connaissances opératoire c'est à dire les règles représentant le savoir-fair de l'expert - Voir annexe B -

Une règle a la forme :

SI < condition > ALORS < conclusion >.

Ces règles sont extraites sur la base des quatres facteurs contrôlants les courbes contrainte-déformation, qui sont le sol, son état, sa structure et le chemin des contraintes.

Nous donnons dans ce qui suit des exemples de ces règles respectivement selon ces facteurs.

a. Sol :

Pour faire une classification des sols, nous avons été ramené à choisir une classification selon les limite d'ATTERBERG donnée par CASAGRANDE .

A paritr de cela nous avons pu construire les règles suivantes :

SI  $w_l$  vaut  $W$   
ET SI :  $W < 35$  est vrai  
ET SI  $i_p$  vaut  $I$   
ET SI :  $I < 25$  est vrai  
ALORS le sol est sable.

SI  $w_l$  est compris entre 20 et 60  
ET SI  $i_p$  est compris entre 5 et 25  
ALORS le sol est limon .

SI  $w_l$  vaut  $W$   
ET SI :  $W > 30$  est vrai  
ET SI  $i_p$  vaut  $I$   
ET SI :  $I > 15$  est vrai  
ALORS le sol est argile .

b. Etat de sol

\* Les sables

Pour savoir si un sable est contractif ou dilatatif, il faut, connaitre son état de densément (dense ou lâche) donc, connaitre sa densité relative ( $d_r$ ), pour un sable de densité moyenne, il faut voir son couple d'état ( $\omega, e$ ) s'il est au dessus ou au dessous de sa courbe d'état.

\* Etat contractif

SI le sol est sable  
ET SI dr est compris entre 0 et 0.3  
ALORS sable est lâche.

SI sable est lâche  
ALORS état est contractif.

\* Etat dilatatif

SI le sol est sable  
ET SI dr est compris 0.3 et 0.6  
ALORS sable est de densité moyenne.

SI sable est de densité moyenne  
ET SI couple d'état est au dessous de la courbe d'état  
ALORS état est dilatatif

\* Les argiles

Une argile dont le degré de surconsolidation est compris entre 1 et 1.1, est normalement consolidée et donc son état est contractif, elle est surconsolidée et son état est dilatatif, si son degré de surconsolidation est supérieur à 1.1.

\* Etat contractif

SI le sol est argile  
ET SI argile est "normalement consolidée  
ALORS état est contractif.

\* Etat dilatatif

SI le sol est argile  
ET SI ocr vaut 0  
ET SI :  $0 > 1.1$  est vrai  
ALORS argile est surconsolidée

c. Structure

Nous donnons deux exemples respectivement quand grains sont sphériques et anguleux.

SI le sol est sable  
ET SI les grains sont sphérique  
ET SI état est contractif  
ALORS la courbe cte-def présent "pas chute  
résist post-pic"

SI le sol est sable  
ET SI les grains sont arguleux  
ET SI état est dilatif  
ALORS la courbe cte-def présente "chute resist  
post-pic"

d. Chemin des contraintes :

SI la stabilité est calculée à court terme  
ET SI état est contractif  
ALORS utiliser essais "non drainés".

SI la stabilité est calculée à long terme  
ALORS utiliser essais drainés.

Finalement pour le choix de la résistance au cisaillement et qui est notre objectif, nous présentons les exemples suivants :

SI la courbe cte-def présente "pas chute résist post-pic"  
ALORS utiliser résistance "correspondant déf maxi-prévue".

SI la courbe cte-déf présente "chute résist post-pic"  
ET SI "déformation maxi-prévue" est supérieure  
"déformation au pic"

ET SI résistance résiduelle est importante  
ALORS utiliser résistance résiduelle.

## 6.2 UNE BASE DE FAITS

C'est en quelque sorte la mémoire de travail du système, elle contient des faits de problèmes que nous avons sélectionné nous même pour la raison de tester notre système. En premier lieu nous avons pris les cas de glissement de J.S POULOS et en deuxième lieu autre cas sélectionnés de telle façon à tester tout les règles du système. (voir ANNEXE B).

Nous donnant les fais suivants :

wl vaut 40.

ip vaut 25.

ocr vaut 12.

" déformation maxi-prévue" vaut 0.15.

" déformation au Pic" vaut 0.10.

résistance résiduelle est trop faible.

Pour le résultat de ce problème le système SERCIS a donné :

Utiliser une résistance supérieure à la résistance résiduelle et dont la déformation n'engendre pas le pic.

## 6.3 UN MOTEUR D'INFERENCE

Le moteur d'inférence représente la partie mécanique du système expert, son rôle est, de pouvoir interpréter les connaissances du domaine traiter et résoudre le problème donné.

Pour ce faire on a utilisé un moteur d'inférence faisant partie du logiciel  $\Sigma$ log (G.O.U.87) crée par Monsieur F.L GOURDET. Il se base sur la stratégie de raisonnement en chainage arrière, il devra prouver le but fixé dès le début, il parcourt l'ensemble des règles à la recherche de celles qui concluent vers ce but.

## 7. QUALITES DU SYSTEME -SERCIS-

Notre système ainsi réalisé a pour but de donner un choix exact sur la résistance de cisaillement pour l'étude de la stabilité d'un talus donné, SERCIS possède plusieurs qualités dont on cite :

\* Les connaissances introduites sous forme de règles de production permettent au système de donner des décisions comparables à celles d'un expert humain en particulier celles relatives au choix de la résistance au cisaillement dans les talus .

\* Le système dispose d'un module d'exploitation de ses décisions ou de ses conseils; et comme il est capable de justifier son raisonnement à la demande de l'utilisateur.

\* Le système possède un module d'acquisition des connaissances qui lui permet de recevoir de nouvelles règles ou d'éliminer certaines, sans remettre en cause le programme .

\* Le dialogue avec la machine se fait à l'aide d'un langage naturel, facilement compréhensible par l'utilisateur .



- CONCLUSIONS -  
&  
- SUGGESTIONS -

## CONCLUSIONS ET SUGGESTIONS

Parmi les problèmes complexes et délicats auxquels l'ingénieur géotechnicien est souvent confronté figure le problème de la détermination de la résistance au cisaillement des sols. Les nombreux essais de laboratoire et in-situ reflètent cette complexité (il n'y a pas un essai typique à utiliser dans toutes les circonstances et pour tous les sols).

L'analyse de stabilité est un problème complexe qui nécessite la considération du caractère de la structure, du degré d'investigation du site, et de la compréhension des courbes contraintes-déformations.

La définition du coefficient de sécurité comme rapport de la résistance moyenne de cisaillement et de la contrainte moyenne de cisaillement appliquée est couramment utilisée. La valeur du coefficient de sécurité, pour une construction donnée, est alors étroitement liée à la valeur de la résistance au cisaillement.

La nature granulaire du sol, qui est totalement ignorée, est généralement à l'origine des inconsistances observées dans les valeurs des paramètres de résistance. La forme des grains et leurs arrangements (paramètres non quantifiables) affectent la résistance maximale et la déformation au pic, et influent sur l'allure de la courbe contraintes-déformations. Par conséquent, ces paramètres (la forme et l'arrangement des grains) doivent être considérés lors de l'interprétation des courbes contraintes-déformations, et lors de la sélection de la résistance au cisaillement pour une analyse de la stabilité.

Dans ce travail, en supposant que la courbe contraintes-déformations est obtenue par un mécanisme de chargement qui simule au mieux le mécanisme probable in-situ, une première approche de sélection de la résistance au cisaillement pour l'analyse de stabilité des talus a été développée. Cette approche se base sur la nature du sol, la forme des grains, et l'allure des courbes contraintes-déformation.

Pour faciliter la tâche de l'analyste, et en se basant sur les expertises de plusieurs spécialistes, un système expert - SERCIS - a été mis au point. Ce système permet de sélectionner la résistance au cisaillement à utiliser dans une analyse de stabilité des talus. Aussi, ce système présente une excellente souplesse pour une extension, ou une amélioration, par consultation des experts ou par introduction de nouvelles expertises.

L'extension du système va concerner beaucoup de problèmes dont on cite les plus importants

1. Le choix du mode de chargement pour simuler les conditions in-situ
2. L'effets des écoulements des eaux
3. La présence des végétations sur le talus
4. La présence des rochers et de graviers dans le talus

Le travail que nous avons réalisé nous a permis d'une part, d'aborder un domaine d'actualité, à savoir l'intelligence artificielle, à travers l'une de ses applications les plus prometteuses que sont les systèmes experts et d'autre part, les entrevues avec nos promoteurs nous ont été d'un apport bénéfique.

- ANNEXES -

- A N N E X E S -  
-oOo-

- ANNEXE A - LES CAS DE GLISSEMENTS PRESENTES PAR J.S. POULOS
- FACTEUR DE SECURITE ET CHEMIN DES CONTRAINTES
  - BARRAGE DE FORT PECK
  - BARRAGE DE VAN NORMAN
  - BARRAGE DE WACO
  - BARRAGE D'OTTER BROOK
  - DIGUE D'ARTERE - HIGH WAY EMBANKEMENT

- ANNEXE B - SYSTEME EXPERT - SERCIS -
- BASE DE CONNAISSANCES
  - BASE DE FAITS

## FACTEUR DE SECURITE ET CHEMIN DES CONTRAINTES

La figure suivante montre sur le diagramme de Mohr l'effet de différents modes de chargements sur le facteur de sécurité calculé.

Le point A représente les contraintes effectives moyennes in-situ le long de la surface de rupture.

Si on crée une rupture drainée en utilisant un chemin de contraintes simulaires à celui appliqué dans l'essai triaxial ; la résistance au cisaillement est donnée par le point S. D'où le facteur de sécurité F dans ce cas est telque :

$$F = \frac{S}{A}$$

D'autre part si la rupture a eu lieu lors d'un essai de cisaillement non drainé et si le sol est contractif, alors la résistance au cisaillement est donnée par le point Q.

Et par conséquent le facteur de sécurité est donné par :

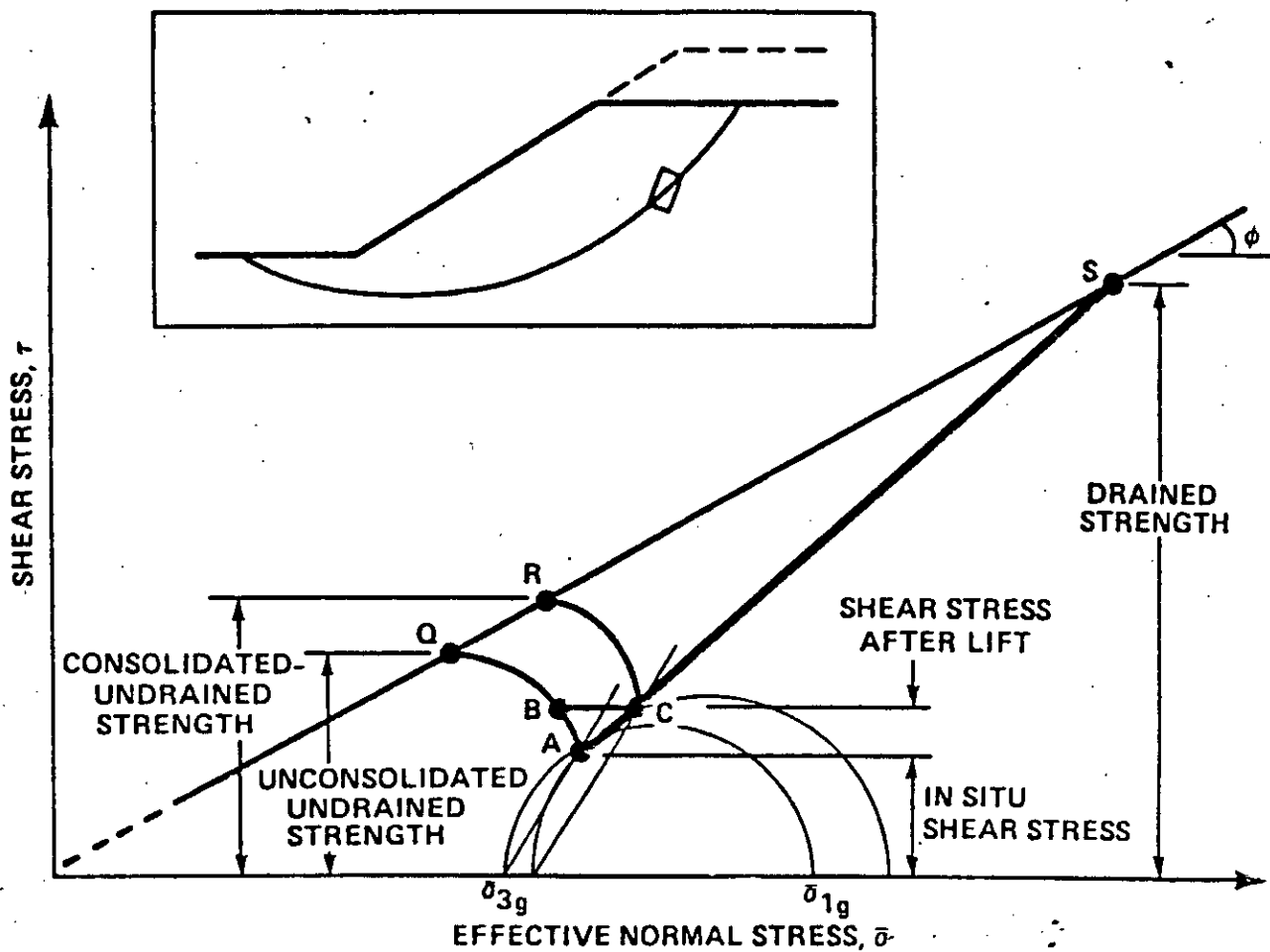
$$F = \frac{Q}{A}$$

Dans le cas intermédiaire où le drainage est toléré avant l'application non drainé du chargement la résistance au cisaillement est donnée par le point R.

Le facteur de sécurité est donné par :

$$F = \frac{R}{A}$$

-2A-



1. BARRAGE DE FORT PECK :

- Rupture due à la liquéfaction .
- Avant rupture le remblai du barrage possédait une pente de 1/4 .
- Après rupture le talus final moyen était presque plat
- LE SOL : Est un sable fin argileux étroitement gradué (granulométrie serrée).
- LA STRUCTURE : Est indiquée par le fait que l'échantillon est compacté.
- L'ETAT : Est contractif (c'est à dire qu'il se comporte comme un sable lâche, alors que les pressions interstitielles dans les échantillons augmentent durant le cisaillement non drainé).
- LE CHEMIN DES CONTRAINTES : Utilisé pour modifier les conditions in-situ est celui obtenu lors d'un essai de cisaillement triaxial non drainé.

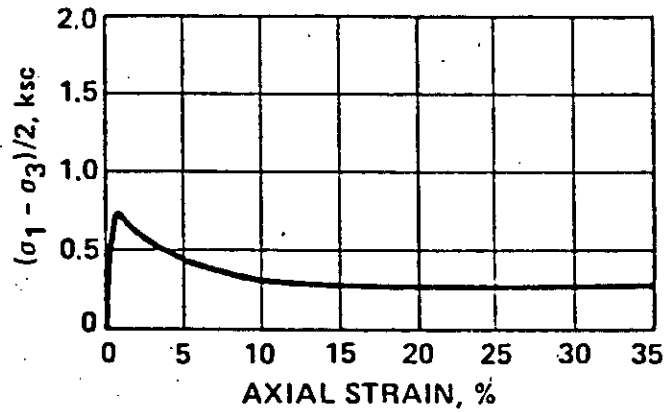
RESULTATS :

- Le pic est obtenu pour faible déformation.
- La résistance résiduelle est atteinte par l'essai triaxial.
- Une grande pression interstitielle est développée durant ce chargement, alors que les contraintes effectives diminuent substantiellement durant le cisaillement.
- La valeur du coefficient A de SKEMPTON aux grandes déformations est supérieure à 6 ( $A > 6$ ) .
- Liquéfaction, ou rupture instantanée peu être causée seulement par l'application de faibles contraintes de cisaillement in-situ.

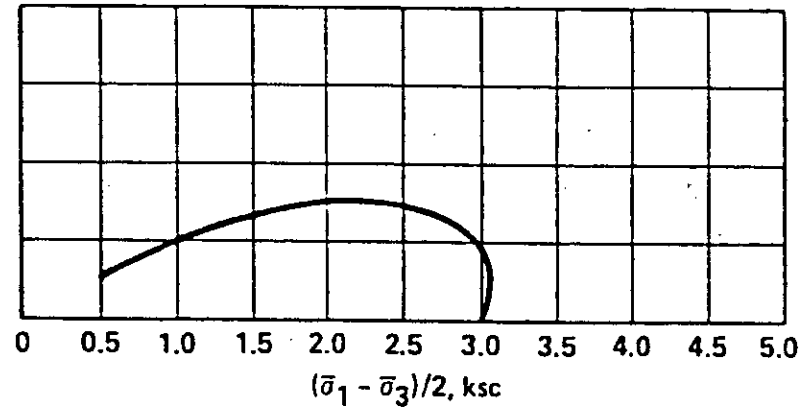


- 4 A -

STRESS-STRAIN



STRESS PATH



- SOIL - NARROWLY-GRADED, ANGULAR FINE SAND
- STRUCTURE - COMPACTED
- STATE - CONTRACTIVE
- STRESS PATH - TRIAXIAL COMPRESSION, UNDRAINED



(GEI 1978)

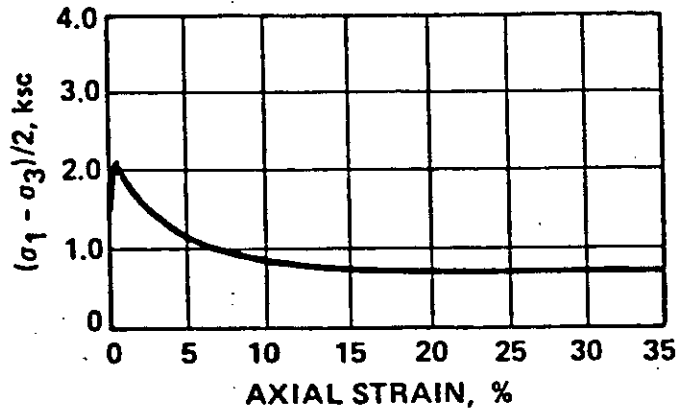
## 2. BARRAGE DE VAN NORMAN :

- Rupture par liquéfaction .
- Avant rupture, le remblai du barrage possédait une pente de 1/3.
- Après rupture, il était de l'ordre de 1/6
- LE SOL : Est un sable fin argileux étroitement gradué.
- LA STRUCTURE : Et indiquée par le fait que l'échantillon est compacté.
- L'ETAT : Est contractif
  
- LE CHEMIN DES CONTRAINTES : Est celui obtenu lors d'un essai de cisaillement triaxial non drainé.  
Sauf que l'échantillon est consolidé d'une façon anisotrope avant le cisaillement.

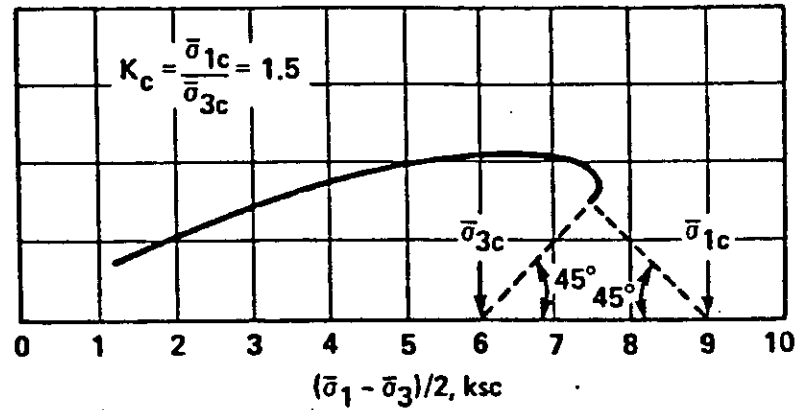
### RESULTATS :

- Le pic est obtenu pour très faible déformation (0.5 %)
- La résistance résiduelle est obtenue par l'essai triaxial.
- $K_0 = 1.5$  et par conséquent la résistance au pic est de  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ .
- Liquéfaction peut être causée seulement par l'application de faibles contraintes de cisaillement in-situ .

STRESS-STRAIN



STRESS PATH



- SOIL - NARROWLY-GRADED, ANGULAR FINE SAND
- STRUCTURE - COMPACTED
- STATE - CONTRACTIVE
- STRESS PATH - TRIAXIAL COMPRESSION, UNDRAINED



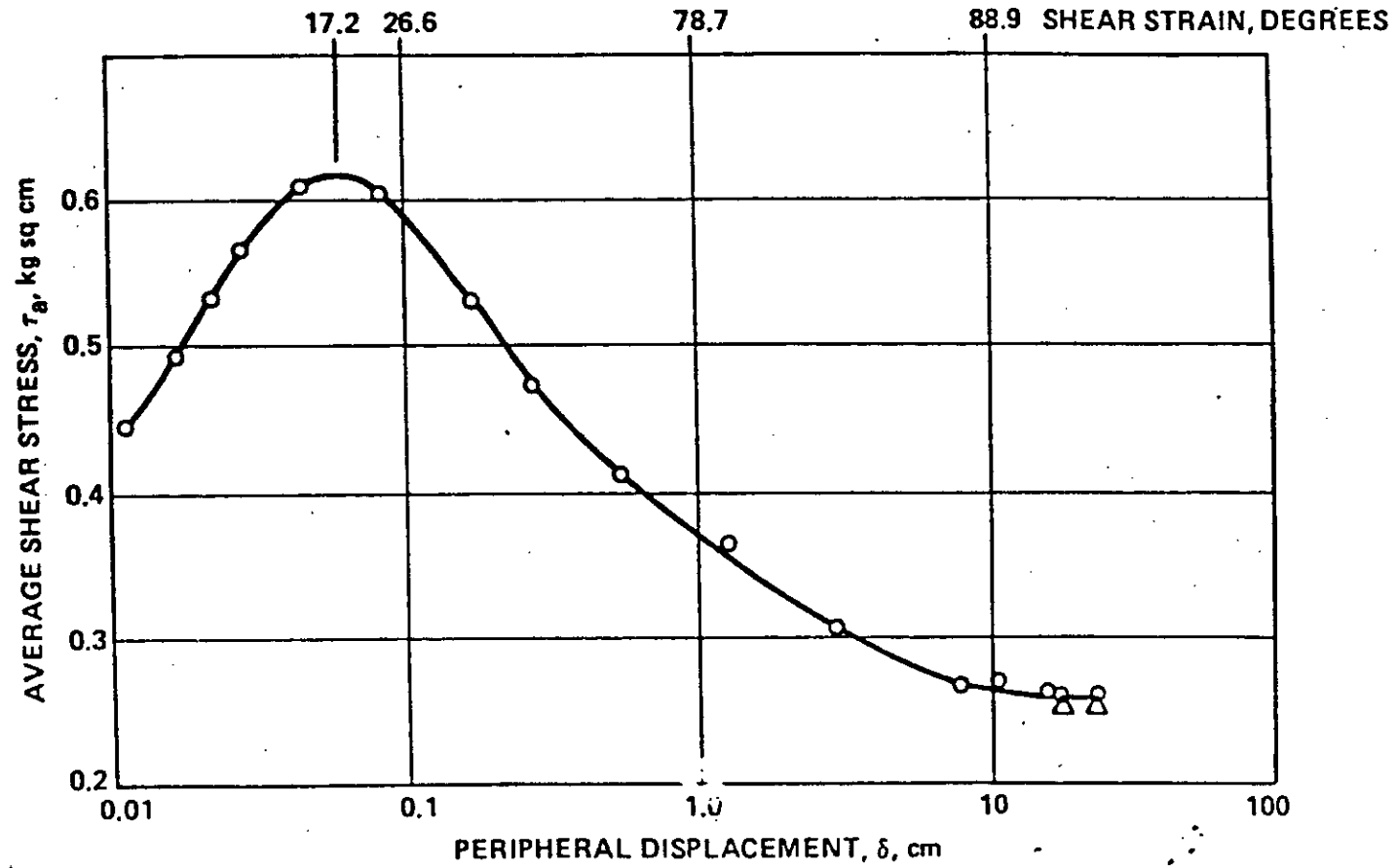
### 3. BARRAGE DE WACO :

- LE SOL : Est une argile schisteuse contenant des grains allongés .
- LA STRUCTURE : Est indiquée par le fait que l'échantillon est non remanié.
- L'ETAT : Est dilatatif (c'est à dire que le sol est très rigide et tend à augmenter en volume lorsqu'il est soumis à un essai de cisaillement.
- LE CHEMIN DES CONTRAINTES : Est celui obtenu lors d'un essai de cisaillement direct drainé.
- Dans ce cas un essai de cisaillement rotationnel a été utilisé pour aller aux grandes déformations.

### RESULTATS :

- La déformation au pic est d'environ  $17^{\circ}$ .
- La résistance au pic est de l'ordre de  $0,61 \text{ kg/cm}^2$ .
- La résistance résiduelle est d'environ  $0,26 \text{ kg/cm}^2$ .
- La sensibilité est de l'ordre de  $2,34$  .

PEPPER SHALE - UNDISTURBED - DILATIVE - ROTATION, DRAINED  
(La Gatta, 1970, Fig. 7-21)



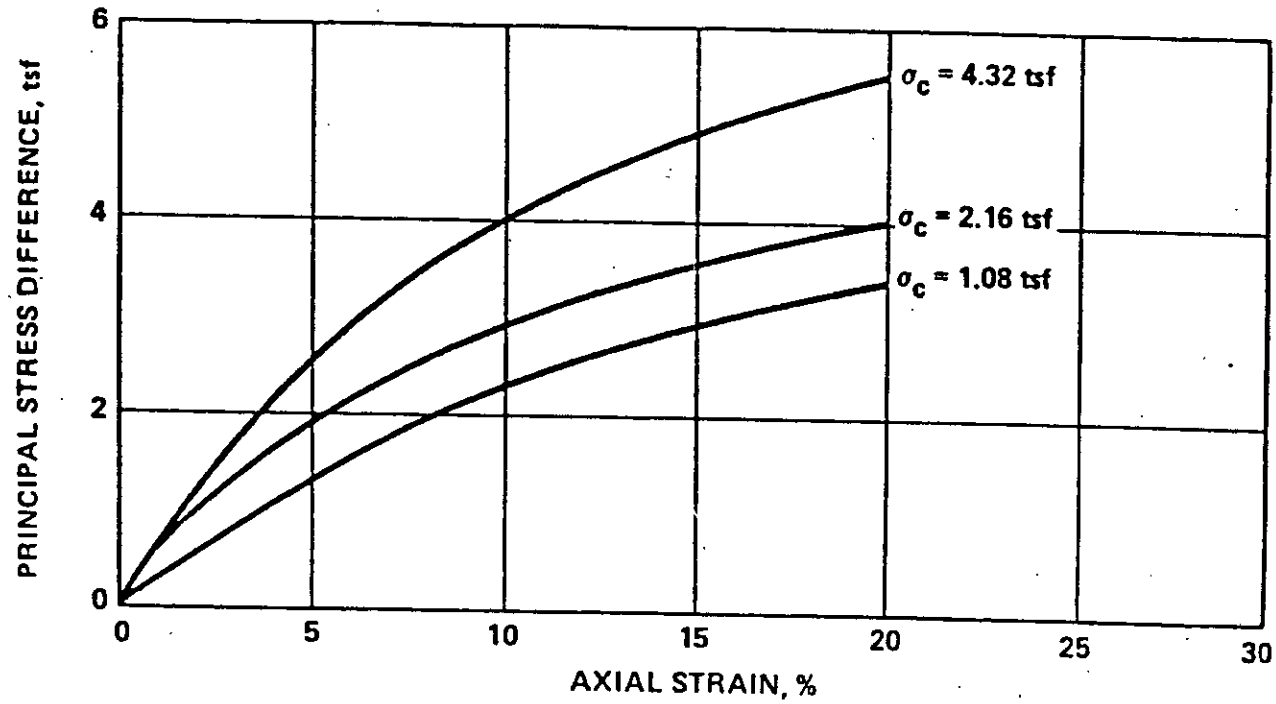
4. BARRACE D'OTTER BROOK :

- LE SOL : Est un sable argileux (moraine glaciaire).
- LA STRUCTURE : Est indiquée par le fait qu'il était compacté .
- L'ETAT : Est contractif (c'est à dire que les pressions interstitielles dans l'échantillon augmentent durant le cisaillement non drainé.
- LE CHEMIN DES CONTRAINTES : Utilisé pour modéliser les conditions durant la construction est celui obtenu lors d'un essai de compression triaxial non drainé.

RESULTATS :

- L'essai est arrêté à 20% de déformation qui est la limite conventionnelle de déformation.
- POULOS indique par expérience que la résistance continue à augmenter jusqu'à une certaine valeur qui reste constante (pas de chute de résistance).
- Le facteur de sécurité était au voisinage de 1

OTTER BROOK DAM  
CLAYEY SAND (TILL) - COMPACTED - CONTRACTIVE - TRIAXIAL, UU



5. DIGUE D'ARTERE (HIGH WAY EMBANKEMENT) :

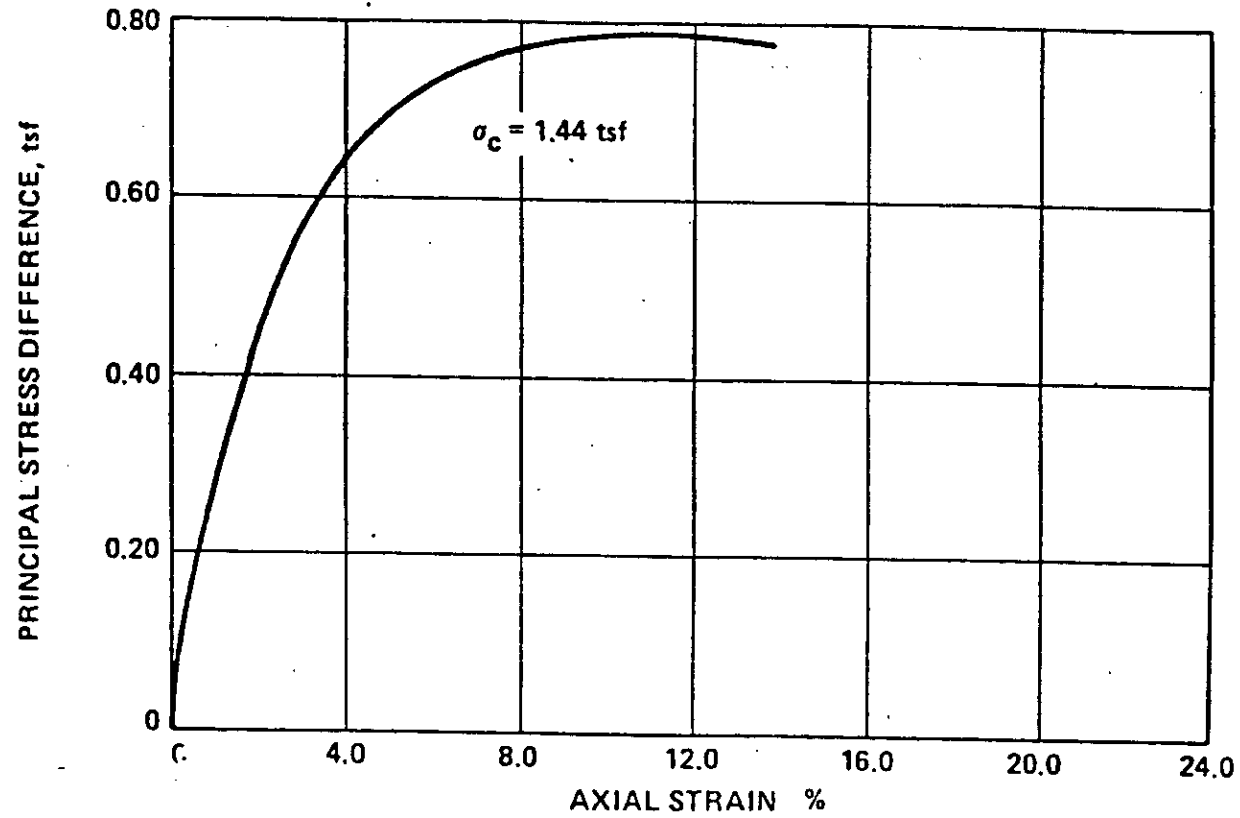
- LE SOL : Est une argile molle
- LA STRUCTURE : Est indiquée par le fait que l'échantillon est non remanié.
- L'ETAT DES CONTRAINTES : Est fortement contractif.
- LE CHEMIN DES CONTRAINTES : Est celui obtenu lors d'un essai de compression triaxial non drainé.
- L'argile était sensitive - probablement d'être formée par déposition à travers les eaux dans un lac glaciaire
- La sensitivité était de l'ordre de 10 à 15.



-12 A-

# HIGHWAY EMBANKMENT

VARVED CLAY - UNDISTURBED - CONTRACTIVE - TRIAXIAL UU



- BASE DE CONNAISSANCES -

SI wl vaut W  
ET SI :  $W < 35$  est vrai  
ET SI ip vaut I  
ET SI :  $I < 15$  est vrai  
ALORS le sol est sable.

SI wl est compris entre 20 et 60  
ET SI ip est compris entre 5 et 25  
ALORS le sol est limon.

SI wl vaut W  
ET SI :  $W > 30$  est vrai  
ET SI ip vaut I  
ET SI :  $I > 15$  est vrai  
ALORS le sol est argile.

SI le sol est sable  
ET SI dr est compris entre 0 et 0.3  
ALORS sable est lache.

SI le sol est sable  
ET SI dr est compris entre 0.3 et 0.6  
ALORS sable est de densité moyenne .

SI le sol est sable  
ET SI dr est compris entre 0.6 et 1.0  
ALORS sable est dense.

SI sable est lache  
ALORS état est contractif.

SI sable est de densité moyenne  
ET SI couple d'état est au dessus de la courbe d'état  
ALORS état est contractif.

SI sable est de densité moyenne  
ET SI couple d'état est au dessous de la courbe d'état  
ALORS état est dilatatif.

SI sable est dense  
ALORS état est dilatatif.

Si le sol est argile  
ET si ocr est compris entre 1 et 1.1  
ALORS argile est "normalement consolidée".

SI le sol est argile  
ET SI argile est "normalement consolidée"  
ALORS état est contractif.

SI le sol est argile  
ET SI ocr vaut 0  
ET SI :  $0 > 1.1$  est vrai  
ALORS argile est surconsolidée.

SI le sol est argile  
ET SI argile est surconsolidée  
ALORS état est dilatatif.

SI l'essai de cisaillement est triaxial  
ALORS "déf limite conv" est compris entre 15 et 20% .

SI l'essai de cisaillement est "cisaillement direct"  
ALORS "déf limite conv" est compris entre 10 et 15% .

SI la stabilité est calculée à long terme  
ALORS utiliser essais drainés.

SI la stabilité est calculée à court terme  
ET SI état est contractif  
ALORS utiliser essais "non drainés".

SI la stabilité est calculée à court terme  
ET SI état est dilatatif  
ET SI mes1 s'affiche  
ALORS utiliser essais "non drainés u".

SI le sol est sable  
ET SI les grains sont anguleux  
ET SI état est contractif  
ET SI le sol est étroitement gradué  
ALORS "déformation au pic" est faible.

SI "déformation au pic" est faible  
ET SI la courbe cte-def présente "chute résist post-pic"  
ALORS utiliser résistance résiduelle.

SI le sol est sable  
ET SI les grains sont sphériques  
ET SI état est contractif  
ALORS la courbe cte-def présente "pas chute résist post-pic".

SI le sol est sable  
ET SI les grains sont sphériques  
ET SI état dilatatif  
ALORS la courbe cte-def présente "chute résist post-pic".

SI le sol est sable  
ET SI les grains sont anguleux  
ET SI état est dilatatif  
ALORS la courbe cte-def présente "chute résist post-pic".

SI le sol est sable  
ET SI les grains sont anguleux  
ET SI le sol est étroitement gradué  
ALORS la courbe cte-def présente "chute résist post-pic".

SI le sol est argile  
ET SI état est dilatif  
ALORS la courbe cte-def présente "chute résist post-pic".

SI "déformation maxi-prévue" vaut DMP  
ET SI "déformation au pic" vaut DAP  
ET SI :  $DMP < DAP$  est vrai  
ALORS utiliser résistance "la déformation maxi-prévue".

SI "déformation maxi-prévue" vaut DMP  
ET SI "déformation au pic" vaut DAP  
ET SI :  $DMP > DAP$  est vrai  
ALORS faire deuxième essai pour atteindre les grandes déformations.

SI la courbe cte-def présente "chute résist post-pic"  
ET SI "déformation maxi-prévue" est supérieure "déformation au pic"  
ET SI résistance résiduelle est importante  
ALORS utiliser résistance résiduelle.

SI la courbe cte-def présente "chute résist post-pic"  
ET SI "déformation maxi-prévue" est supérieure "déformation au pic"  
ET SI résistance résiduelle est trop faible  
ET SI mes2 s'affiche  
ALORS utiliser résistance ">résist rési déf<déf-pic".

SI la courbe cte-def présente "pas chute résist post-pic"  
ALORS utiliser résistance "correspondant déf maxi-prévue".

SI X vaut Y  
ET SI :  $Y < B$  est vrai  
ET SI :  $Y > A$  est vrai  
ALORS X est compris entre A et B.

SI X vaut Y  
ET SI Z vaut B  
ET SI :  $Y < B$  est vrai  
ALORS Z est supérieure à X.

expo?

utiliser résistance qui?

le sol est 'quoi?

état est 'comment?

utiliser essais 'comment?

faire deuxième essai pour atteindre les grandes déformation?

argile est 'comment?

sable est 'comment?

la courbe cte-def présente 'quoi?

"déformation au pic" est 'comment?

expo ?

N.B

mes1 : Vous devez utiliser des essais non drainés avec mesure des pressions interstitielles. Les paramètres géométriques de résistance seront CBarre et Phibarre .

mes2 : Utiliser la résistance supérieure à la résistance résiduelle dont la déformation est inférieure à la déformation au Pic.

BASE DE FAITS

ESSAI1.BF

wl vaut 35.  
ip vaut 19.  
ocr vaut 1.9.  
la stabilité est calculée à court terme.  
" déformation maxi-prévue " vaut 0.12.  
" déformation au pic " vaut 0.15.  
résistance résiduelle est trop faible.

ESSAI2.BF

wl vaut 37.  
ip vaut 20.  
ocr vaut 1.5.  
" déformation maxi-prévue " vaut 0.10.  
" déformation au pic " vaut 0.15.

ESSAI3.BF

wl vaut 40.  
ip vaut 25.  
ocr vaut 1.2.  
" déformation maxi-prévue " vaut 0.15.  
" déformation au pic " vaut 0.10.  
résistance résiduelle est trop faible.

ESSAI4.BF

wl vaut 25.  
ip vaut 10.  
dr vaut 0.25.  
les grains sont anguleux .  
le sol est étroitement gradué.

ESSAI 5.BF

wl vaut 15.

ip vaut 14.

dr vaut 0.45.

le couple d'état est au dessous de la courbe d'état.

les grains sont spheriques .

" déformation maxi-prévue " vaut 0.15.

" déformation au pic " vaut 0.10.

résistance résiduelle est trop faible.

ESSAI 6.BF

wl vaut 25.

ip vaut 10.

dr vaut 0.25.

les grains sont spheriques.

ESSAI 7.BF

wl vaut 15.

ip vaut 14.

dr vaut 0.45.

couple d'état est au dessus de la courbe d'état.

les grains sont anguleux.

le sol est étroitement gradué.

ESSAI 8.BF

wl vaut 15.

ip vaut 14.

dr vaut 0.45.

le couple d'état est au dessous de la courbe d'état.

les grains sont anguleux.

le sol est étroitement gradué.

" déformation maxi-prévue " vaut 0.15.

" déformation au pic " vaut 0.10.

résistance résiduelle est trop faible.



- BIBLIOGRAPHIE -

## BIBLIOGRAPHIE

- (BAI 88) BAILLY, C., CHALLINE, J.F., GLOESS, P.Y., FERRY, H.C.,  
MARCHESIN, B.  
" Les langages orientés objets: concepts, langage et  
application ",  
CEPADUES-EDITIONS 1988
- (BAR 84) BARR, A., FEIGENBAUM, E.A.  
" LE manuel de l'intelligence artificielle",  
EYROLLES, 1984.
- (BED 85) BEDOIN, N.  
"Formalisme -objet et psychologie cognitive".  
L.E.A.C.M, Laboratoire d'Enregistrement et d'analyse  
des comportements et Messages, 1985.
- (BEN 87) BENTLEY, S.P. et SMALLEY, I.J.  
"Slides in sensitive clays" article de : 'Slope  
instability'  
WILEY-Interscience publication Sept 1987.
- (BJE 67) BJERRUM, L et KENNEY, T.C.  
"Effet of structure on the streal behaiour of normally  
consolidated quick clays"  
présenté dans la conférence de géotechnique, OSLO, 1967.
- (BON 84) BONNET, A.  
"I.A: promesses et réalités"  
INTER EDITIONS, 1984.
- (BON 86) ALAIN BONNET, JEAN PAUL HATON  
JEAN-MICHEL TRUONG-NGOC  
"Systèmes-Experts vers la maîtrise technique"  
INTER EDITION
- (BRI 88) BRIAND, R  
"Méthodes de développement des systèmes experts"  
EYROLLES, 1988.

- (BUCH 78) BUCHANAN, B.G., FEIGENBAUM, E.A.,  
"DENDRAL and META-DENDRAL : their applications  
dimensions"  
ARTIFICIAL INTELLIGENCE VOL 11, 1978.
- (DEL 87) DELAHAYE, J.P.  
"Système expert : Organisation et programmation des  
bases de connaissances en calcul propositionnel"  
EYROLLES, 1987.
- (DUD 79) DUDA, R.O., CASCHING, J., et HART, P.  
"Model design in the PROSPECTOR consultant system for  
mineral exploration"  
EDIMBERGH UNIVERSITY PRESS.
- (FAR 85) FARRENY, H.  
"Les S.E, principes et exemples"  
CEPADUES, 1985.
- (FRE 88) FRECON, L.  
"La représentation des connaissances".  
C.I.R.I.L.L.E, AFCET LYON, 1988.
- (GRA 87) GRAHAM, J.  
"stability analysis methods"  
'SHOPE INSTABILITY'.
- (GRO 88) GROSS, L.  
"extaction des connaissances"  
AFCET, LYON 1988.
- (HAR 91) HARZALLAH, A.  
"les systèmes experts"  
TECHNIQUE ET SCIENCES alger NOV, 1991.
- (HIR 63) HIRSCHFELD, R.C., et POULOS, S.J.  
"high pressure triaxial tests on a compacted sand and  
on indisturbed silt"  
CONFERENCE SUR LES ESSAIS DE CISAILLEMENT, OTTAWA Sept  
1963.

- (HUT 85) HUTCHINSON, P  
"An expert system for the selection of earth retaining structure"  
UNIVERSITE DE SYDNEY AUSTRALIA, 1985.
- (KEN 87) KENNEY, C.  
"Slope instability"  
WILEY-INTERSCIENCES PUBLICATION, SEPT 1987.
- (LAG, 70) LAGATTA, D.P.  
"Residual strength of clays and clay-shales by rotation shear tests"  
JANVIER 1970.
- (MIY 86 a) MIYASATO, G.H  
" Emplementation of a knowledge-based sismic risk evaluation system",  
1986.
- (MIY 86 b) MIYASATO, G.H, DONG, W., LEVITT, R.E., BOISSONADE, A.C., et SHAH, H.C.  
"Sismic risk analysis system".  
1986.
- (MUL 85) MULARKEY, P.W., FENVES, S.J., et SANGREY, D.A.  
"CONE :An expert system for interpretation of geotechnical characterization data from cone penetrometres"  
MARS 1985.
- (NOR 85) NORKIN, D.D.  
"Expert system frame work for geotechnical site characterization"  
UNIVERSITY DE CAMEGIE-MELLON, PITTSBURGH  
MAIS 85.

- (PIN 81) PINSON, S.  
"Représentation des connaissances dans les systèmes experts"  
R.A.I.R.O. INFORMATIQUE, VOLUME 15, NXY, 1981.
- (POU 79) STEVE I. POULOS  
"Effects of large strains on shear strength selection for stability analysis."  
BSCES GEOTECHNICAL LECTURE SERIES 4 DEC, 1979.
- (SHO 76) SHORTLIFFE, E.H.  
"Computer-based medical consultations : MYCIN"  
ELSEVIER, 1976.
- (SKE 64) SKEMPTON, A.W.  
"Long-term stability of clay slopes"  
FOURTH RANKINE LECTURE, JUNE 1964.
- (VOY 87) VOYER, R.  
"Moteurs de système experts"  
EXROLLES, 1987.
- (WAT 86) WATERMAN, D.A.  
"A guide to expert systems"  
ADDISON WELLEY, 1986.
- (WHA 86) WHARRY, M.B., et ASHLEY, D.B.  
"Resolving subsurface risk in construction using an expert system"  
REPORT TECHNIQUE UTCEPM -86-1,  
UNIVERSITE DE TEXAS AUSTIN, TX 1986.