

ANNEE 1992

50 376  
1992  
355

61 589

N° D'ORDRE : 1020

50376  
1992  
355

# THESE DE DOCTORAT

présentée à

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DE LILLE / FLANDRES-ARTOIS

Pour obtenir le grade de Docteur  
Spécialité : GENIE CIVIL

par :

**Chérif BOULEMIA**  
Ingénieur en Génie Civil

## CONTRIBUTION A LA PRISE EN COMPTE DU SOL POUR LA CONCEPTION DES INFRASTRUCTURES: LE SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES " KBSOL ".



Soutenu le 19 Novembre 1992 devant la commission d'examen

### Membres du Jury :

MM	P.	MICHEAU	Président
	J.L.	FAVRE	Rapporteur
	J.C.	MANGIN	Rapporteur
	D.	BOISSIER	Directeur de Thèse
	A.	DE METS	Examineur
	I.	SHAHROUR	Examineur

## **AVANT-PROPOS**

*Au terme de ce travail, réalisé au Laboratoire Méthodes et Habitat sous la direction de Monsieur BOISSIER, je tiens à le remercier ici pour toute la rigueur qu'il m'a imposée et la part importante qu'il a prise dans ma formation de chercheur.*

*Je suis particulièrement sensible à l'honneur que m'a fait Monsieur MICHEAU, Professeur à l'université de Lille I en présidant ce jury.*

*Monsieur MANGIN professeur à l'ESIGEC, Université de SAVOIE et Monsieur J.L. FAVRE professeur à l'école centrale de PARIS pour avoir accepté de juger mon travail. Je les remercie vivement pour leurs conseils.*

*Monsieur I. SHAHROUR professeur à l'école centrale de Lille et Monsieur A. DE-METS Professeur et Chef de département de génie civil à l'école des mines de DOUAI qui m'ont fait l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury.*

*Je remercie aussi sincèrement tous mes collègues chercheurs au laboratoire et plus particulièrement Monsieur HENRY qui par ses relectures minutieuses de ce mémoire, et son soutien précieux.*

## **RESUME**

*Le travail présenté ici est une contribution à la prise en compte du sol pour l'aide à la conception des infrastructures; nous montrons l'intérêt de disposer d'un noyau d'informations commun sur le sol ouvert, partageable et auto-enrichissant.*

*Notre choix s'est porté sur la réalisation d'un système à base de connaissances sur le sol.*

*La mise en place de ce système a été réalisée en suivant la méthodologie KADS; nous avons construit le modèle conceptuel des données sur le sol et recensé les traitements ainsi que les acteurs de la conception des infrastructures.*

*A partir de la modélisation des données, des traitements et des différents scénarii, la maquette KBSOL a été développée sur la plate-forme KOOL (Knowledge representation Object Oriented Language), un générateur de système expert orienté objet.*

*Les traitements et les règles permettent de faire une analyse de la cohérence des informations disponibles sur le sol dans le cadre d'un projet et d'avoir une meilleure appréciation de la qualité de la connaissance du sol.*

*Nous montrons un des intérêts de ce système à base de connaissances par son couplage à un logiciel technique de calcul des fondations ('EVALFOND'), à un module technique relatif aux travaux de terrassement ('KBTERRAS') et à une base de données sur le sol ('BDSOL').*

**MOTS CLES:** *Infrastructures, Campagne de sol, Représentation des connaissances, Système à base de connaissances.*

## **ABSTRACT**

*This work contributes to take into account the soil for substructures aided design. We show the interest to dispose of an information's common core on an open, shared and self enriching soil.*

*Our choice was based on the developement of a Knoweldge Based System on the Soil.*

*The system was realized by following KADS methodology; we have constructed the conceptuel model of the soil data and have made an inventory of the treatments and actors of the substructures design.*

*From the modelization of the data, treatments and different scenarii, the model KBSOL was developed on a KOOL platform (Knowledge representation Object Oriented Language), an expert system generator object oriented.*

*The treatments and rules allow analysis of the informations coherence within a project, and a better appreciation of the soil knowledge quality.*

*One of this knowledge based system interests is shown through its coupling with a technical soft for for foundations assessment (EVALFOND), a technical module for earthworks (KBTERRAS), and a soil data base (BDSOL).*

**KEYWORDS:** *Substructures, Soil investigation, Knowledge representation, Knowledge based system.*

# **SOMMAIRE**

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE I : LE CONTEXTE DE L'ETUDE et LES OUTILS</b>	
<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>Chapitre 1 : La problématique</b>	
1.0 Présentation	4
1.1 Le projet bâtiment	4
1.2 La prise en compte du sol dans les problèmes techniques	5
1.3 Conclusion	8
<b>Chapitre 2 : Le contexte CAO</b>	
2.0 Présentation	9
2.1 Les techniques informatiques avancées	9
2.2 Les systèmes de CAO	15
2.3 Les systèmes existants en génie civil et architecture	16
2.4 Conclusion	19
<b>Chapitre 3 : L'incertain et le traitement des données</b>	
3.0 Présentation	20
3.1 Les sources d'incertitude sur le sol	20
3.2 L'analyse des incertitudes	21
3.3 Les approches de l'incertain	21
3.4 Les méthodes de traitement	22
3.5 Synthèse sur les méthodes	26
3.6 Conclusion	27
<b>Chapitre 4 : Cahier des charges d'un SBC pour le sol</b>	
4.0 Présentation	28
4.1 Constat	28
4.2 Les objectifs	28
4.3 Le cahier des charges	29
4.4 Proposition	29
<b>Conclusion de la première partie</b>	<b>30</b>

## **PARTIE II : LES ELEMENTS DE REPONSE**

<b>Introduction</b>	<b>31</b>
<b>Chapitre 1 : Eléments de méthodologie</b>	
1.0 présentation	32
1.1 La notion de système et de méthode	32
1.2 Les différents systèmes	33
1.3 Les méthodes de développement des systèmes d'informations	33
1.4 Les méthodes de développement des systèmes a base de connaissances	36
1.5 Le développement de systèmes d'informations intégrés	38
1.6 Conclusion	38
<b>Chapitre 2 : Modélisation des Objets</b>	
2.0 Présentation	39
2.1 définition du projet	39
2.2 Modélisation du monde réel	40
2.3 Réalisation du modèle conceptuel	54
2.4 Conclusion	56
<b>Chapitre 3 : Les Traitements</b>	
3.0 Présentation	57
3.1 Modèle des traitements	57
3.2 L'analyse de cohérence	57
3.3 Traitement à partir de cas de sols bibliographiques	73
3.4 Synthèse et perspectives	76
3.5 Enchaînement des traitements	77
3.6 Les limites des traitements	79
3.7 Conclusion	79
<b>Chapitre 4 : Implémentation</b>	
4.0 Présentation	80
4.1 Le Modèle de Coopération	80
4.2 Structure de la base de connaissances	83
4.3 Conclusion	96
<b>Conclusion de la deuxième partie</b>	<b>97</b>

## **PARTIE III : UTILISATION DE LA BASE DE CONNAISSANCES**

<b>Introduction</b>	98
<b>1 Chapitre 1 : Exemple d'application</b>	
1.0 Présentation	99
1.1 Présentation du projet exemple	99
1.2 Saisie du projet	100
1.3 Analyse de cohérence	104
1.4 Conclusion	116
<b>Chapitre 2 : Couplage</b>	
2.0 Présentation	117
2.1 Les différents couplages	117
2.2 Couplage faible: Kbsol-Evalfond	118
2.3 Couplage fort: Kbsol - Bdsol	127
2.4 Intégration: Kbsol - Kbterras	132
2.5 Synthèse sur les couplages et perspectives	134
2.6 Conclusion	136
<b>Conclusion de la troisième partie</b>	137
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	138
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	140
<b>GLOSSAIRE</b>	146

---



# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

### **Le contexte de conception**

Dans le processus de conception et de production d'un bâtiment, la gestion des informations relatives au projet et l'échange de ces informations entre les divers participants tiennent une place essentielle; dans la pratique, cette gestion soulève des difficultés de mise en oeuvre qui ralentissent le travail individuel de conception ainsi que la communication entre les intervenants.

La conception des infrastructures de bâtiment est un sous-problème de celui plus général de la conception du bâtiment, de l'intégration du projet dans le site, de son adaptation au sol et de sa connexion aux réseaux.

Le problème de la conception des infrastructures est composé lui-même de plusieurs sous-problèmes.

Ces sous-problèmes parfois conflictuels se partagent souvent les mêmes informations.

Ces informations proviennent d'une campagne de reconnaissance de sol qui est conduite en plusieurs opérations: reconnaissance visuelle, recherche de documents, reconnaissance des constructions existantes, campagne(s) d'essais et campagne(s) complémentaire(s).

La résolution des différents sous-problèmes aussi bien en conception qu'en réalisation utilise alors ces informations: implantation des bâtiments, conception des fondations, conception des réseaux et voiries, exécution des fondations et des terrassements.

### **Les aides informatiques**

Les systèmes informatiques en Génie Civil ont pour finalité l'aide à la proposition d'une solution et son évaluation, selon différents points de vue, pour sa validation ou pour son rejet.

Les attentes des utilisateurs sont des outils d'aides :

- aide à la construction d'une proposition,
- aide à la gestion des données complexes,
- modification pour améliorer une proposition,
- aides à la production de documents, ...

Les systèmes informatiques assument des fonctions aussi diverses que gérer des données - fonction SGBD-, visualiser des objets complexes -fonction graphique-, et évaluer techniquement et économiquement des solutions -fonction calcul- .

### **Les techniques informatiques avancées**

L'introduction récente en Génie Civil de l'intelligence artificielle, permet de prendre en compte les règles du savoir-faire des concepteurs; de nombreuses équipes de recherche travaillent sur le thème de l'utilisation des systèmes experts dans le secteur du BTP [ZREIK et al, 88], [MACGILCHRIST, 90], [BOISSIER et al, 83], [DUFU et al, 90], ...

En outre, il est évident qu'une association Systèmes Experts (SE) - Systèmes de CAO est potentiellement apte à mieux aider le concepteur.

Le rapprochement actuel et mutuel entre les outils de l'informatique traditionnelle et de l'IA est dû en grande partie à l'approche orientée objet.

L'approche orientée objet concerne les langages de programmation, les bases de données et les méthodes de conception; elle se prête bien à la représentation des connaissances en mode déclaratif.

L'approche IA et l'approche orientée objet contribuent au développement des Systèmes à Base de Connaissances (SBC); ceux-ci ne sont pas uniquement utilisés pour un interfaçage entre un Système Expert et une Base de Données mais sont de véritables systèmes d'informations intégrés.

En conclusion, la tendance actuelle n'est pas de remettre en cause les outils de CAO existants pour les remplacer par des produits de l'IA; il s'agit en fait d'identifier au sein de chaque application, les sous ensembles dont la solution ne peut relever que d'une technique propre à l'IA et de les intégrer alors dans des systèmes de CAO pour former ce que l'on peut appeler de la conception intelligemment assistée par ordinateur (CIAO).

### **La présentation du rapport**

Notre travail a pour objectif une meilleure prise en compte du sol pour la conception des infrastructures; l'importance que revêt la connaissance du sol et les incertitudes qui le caractérisent nous ont orienté vers la constitution d'un système à base de connaissances.

Dans la **première partie**, nous rappelons la nécessité de la connaissance du sol pour tous les projets d'infrastructures.

Après avoir présenté les différents intervenants dans le processus de conception de ces projets et identifié l'incertitude comme composante forte de la connaissance du sol, nous faisons une étude critique des outils informatiques actuels; nous présentons également quelques systèmes informatiques utilisés en Génie Civil.

Enfin nous définissons le cahier des charges de notre travail.

La **seconde partie** est consacrée à la modélisation du système à base de connaissances pour le sol (KBSOL).

Dans ce but, nous présentons tout d'abord une synthèse sur les méthodes de développement des systèmes informatiques et en retenons une pour notre application.

A partir du choix de méthode, nous définissons les différents modèles ainsi que les scénarii d'utilisation.

Nous présentons une maquette informatique.

La **troisième partie** présente tout d'abord un exemple de construction et d'utilisation de cette base de connaissances pour juger de la cohérence des données; ensuite, nous montrons l'intérêt du couplage de cette base de connaissances avec deux applications faisant appel à la connaissance du sol et avec une base de données; enfin nous présentons une synthèse de ces différents modes de communication.

---

# **PARTIE I**

## **LE CONTEXTE DE L'ETUDE ET LES OUTILS**

## INTRODUCTION

Trop souvent par le passé, les concepteurs d'ouvrage n'ont pas donné assez d'importance à la connaissance des caractéristiques du sol de construction.

Cet état d'esprit disparaît peu à peu car il a conduit à des solutions de rattrapage sur les chantiers qui, la plupart du temps, ont pour le maître d'ouvrage des conséquences financières fâcheuses, parfois même catastrophiques.

Par ailleurs la rareté des terrains en site urbain conduit à entreprendre des opérations sur des terrains de "mauvaise qualité" qui, il y a quelques années auraient été délaissés [CASSAN, 88].

La conception des infrastructures nécessite la connaissance du sol; cette connaissance est souvent entachée d'incertitudes.

Celles ci sont dues à plusieurs facteurs tels que: remaniement de l'échantillon, homogénéité du sol, représentativité de l'essai,...

Dans cette première partie, nous présentons au premier chapitre les sources d'informations sur le sol, les intervenants ainsi que les techniques qui utilisent cette connaissance.

Au deuxième chapitre, nous présentons les sources d'incertitudes sur le sol, et l'approche technique que nous avons retenu pour les prendre en compte.

Le troisième chapitre concerne les outils et systèmes informatiques existants.

Enfin, le dernier chapitre est consacré à la définition du cahier des charges de notre application.

---

## CHAPITRE 1 : LA PROBLEMATIQUE

### 1.0 PRESENTATION

Dans ce chapitre, nous présentons à travers le problème de la prise en compte du sol, les différentes étapes et études du sol nécessaires à tout projet d'infrastructures.

L'infrastructure concerne les projets de fondations, de voiries et de réseaux,...

Nous insistons aussi sur les différents utilisateurs concernés par cette connaissance du sol et sur la notion d'incertitude liée à cette connaissance.

### 1.1 LE PROJET BATIMENT

Dans le domaine du génie civil, à chaque projet, un nouveau processus est mené par une équipe pluridisciplinaire d'intervenants.

La complexité de l'objet bâtiment, la masse d'informations hétérogènes mis en oeuvre pour sa conception, puis sa réalisation ont entraîné la division de la fonction de conception en trois grandes parties:

- fonction architecturale,
- fonction technique,
- fonction économique.

Au sein de chacun de ces trois grands domaines, il existe de nouveau un morcellement imposé par les différentes professions avec leurs exigences propres et leurs différents points de vue, morcellement s'accroissant avec l'évolution des techniques.

La variété des compétences nécessaires à la conception exige la spécialisation des acteurs qui y concourent, au sein d'un certain nombre de tâches réparties.

Parallèlement à cet éclatement des tâches, doit s'établir un transfert d'informations d'autant plus important, que les domaines concernés intéressent plusieurs acteurs à la fois, et que l'on se situe dans les phases précoces de conception.

Le bâtiment ne peut être conçu que dans sa globalité: tout système d'aide à la conception ne peut se limiter à l'optimisation d'une seule composante de la performance ou de la qualité du projet [BOISSIER, 82].

Il doit davantage s'attacher à proposer des solutions raisonnables dans un contexte commun à différentes sources de connaissances.

Cela induit deux nécessités:

- traduire les décisions prises dans les autres domaines dans le langage propre à chaque acteur,
- gérer la cohérence et les conflits entre les flux d'informations transitant entre les différents niveaux d'évaluation.

La conception d'un bâtiment relève donc d'un processus de résolution de problème multi-critères. Or, une réponse multi-critère optimale ne peut pas être obtenue par composition de réponses élémentaires optimales [BOISSIER, 82] [ADOLPHE, 91].

Il est nécessaire de tenir compte de façon pertinente des relations qui existent entre les sous-systèmes, tout en laissant les différents intervenants relativement libres à l'intérieur de leur discipline (et les sous-systèmes liés).

Dans ce contexte, notre préoccupation se situe au niveau de la fonction technique qui est elle-même décomposée en plusieurs fonctions: fondations, sol, terrassement,...

## **1.2 LA PRISE EN COMPTE DU SOL DANS LES PROBLEMES TECHNIQUES**

### **1.2.1 Les problèmes**

La diversité des constructions et de la nature des terrains aussi bien en plan qu'en élévation fait qu'il n'existe pas de solution type à appliquer mécaniquement, mais seulement des familles de solutions qu'il faut adapter au problème posé [PUTATTI, 79].

En outre, l'infrastructure met en jeu de nombreuses techniques qu'il faut coordonner.

Les données sur le sol sont utilisées pour un ensemble de problèmes techniques:

- l'implantation du bâtiment nécessite la connaissance des qualités du sol, de la constructibilité et des accidents éventuels (failles,... ),
- le choix et le calcul des fondations demandent des connaissances sur la résistance mécanique et les tassements possibles du sol,
- les terrassements nécessitent de connaître les caractéristiques de foisonnement, de réutilisation des sols en remblais et en couches de forme,
- le tracé des réseaux nécessite la connaissance des éléments préexistants, des difficultés de terrassement,
- les travaux de voiries nécessitent la connaissance de la qualité des couches et de l'utilisation des matériaux.

### **Les fondations**

Les fondations constituent dans un bâtiment l'ouvrage destiné à transmettre les charges de la superstructure au sol.

Elles tiennent compte des caractéristiques de ces deux derniers éléments qu'elles relient de façon ultime.

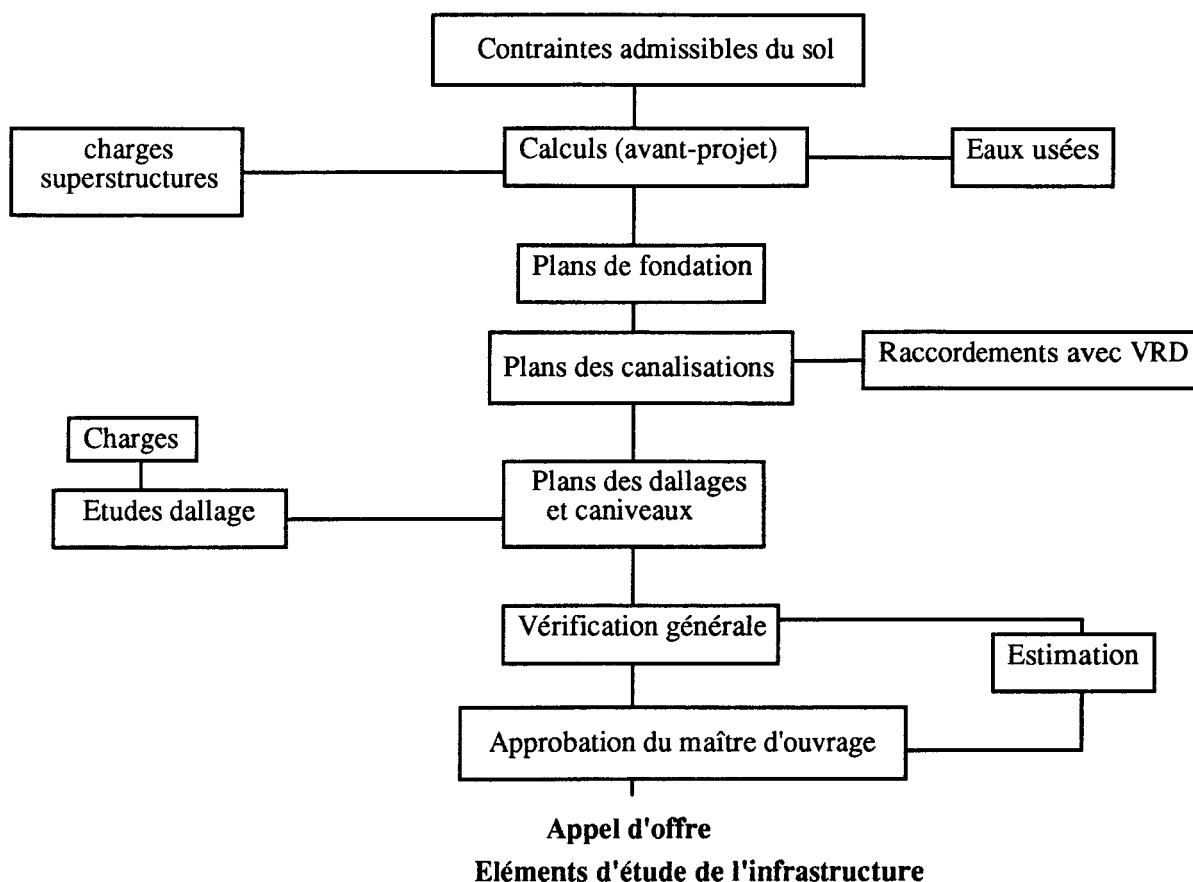
La solution des problèmes de fondations est fonction de la nature du sol d'assise : il s'agit de s'adapter au sol présent par l'intermédiaire des fondations dans le but d'assurer la stabilité de l'ouvrage; bien souvent, la nature des couches de sol sous l'ouvrage impose une adaptation des fondations au terrain.

### **Les terrassements et les VRD**

Généralement, ces travaux sont réalisés par des techniques de travaux publics, pour aménager le terrain brut, préparer les plates-formes, mettre en place les réseaux d'assainissement, effectuer les travaux de terrassement,...

Ces travaux s'exécutent généralement en deux phases, avant la construction des bâtiments (travaux de terrassement, couches de fondation de chaussée, préparation des plates-formes.) et après la fin des travaux de gros oeuvre (remise en état des chaussées, pose des canalisations,...).

Tous ces travaux sont étudiés relativement indépendamment les uns des autres, tout en tenant compte des contraintes provenant du bâtiment et du sol.



[fig 1]. Les liaisons entre la structure et l'infrastructure [BAYON, 87]

Les différentes liaisons indiquées sur la figure 1 sont indispensables puisqu'en fonction de l'étude préliminaire et de la reconnaissance du sol, on commence à considérer les travaux de terrassement et les VRD; les plans conditionnent eux aussi ces travaux en vue de préparer les plates-formes.

#### Les travaux de terrassement

La modification des niveaux du sol est réalisée par l'exécution des déblais et des remblais; la connaissance des paramètres et de la configuration du sol est à ce stade essentielle puisque l'opération fouille et la détermination des pentes de talus dépendent de la connaissance du sol.

#### Les voiries

Pour la circulation des engins dans le chantier, on choisit le tracé définitif des voiries en fonction des plans des chaussées.

La connaissance du sol et des engins conditionne le choix du type de chaussée (épaisse, légère,...) et le choix des matériaux à employer.



## Les réseaux d'assainissement

Le but recherché, lors de l'élaboration d'un projet de réseaux, est d'obtenir un ouvrage qui remplira correctement son rôle dans le temps, et qui sera d'une mise en oeuvre la plus aisée et la moins coûteuse possible; il ne devra pas avoir non plus de conséquences néfastes sur l'environnement.

Nous savons qu'il y a une interaction étroite entre le comportement de l'ouvrage en service, le comportement des terrains et les conditions d'exécution.

Les principaux problèmes d'assainissement sont: fissures, cassures et effondrements des réseaux, canalisations déboîtées, érosion,...

Si certains de ces désordres sont liés à la pose de la canalisation et d'autre à la nature du matériau, la plupart peuvent être imputés de près ou de loin au sol environnant, à sa nature et à son comportement (glissement, tassement,...) [LCPC, 88]

## La reconnaissance de sol

Une reconnaissance géotechnique est un ensemble d'investigations menées sur un site, avec pour objectif de déterminer les possibilités constructives du terrain ou d'obtenir les informations nécessaires à la définition et au calcul des fondations, à l'analyse des travaux de terrassement,... [CASSAN, 79,88], [BOISSIER, 82].

Pour cela il faut:

- établir la nature des couches de terrains et leur géométrie,
- apprécier l'éventualité de la présence d'eau et l'importance de la fluctuation de la nappe,
- estimer ou mesurer les caractéristiques géotechniques des différentes couches,
- détecter toute anomalie dont le contexte géologique permet d'envisager l'existence.

La caractéristique principale de cette reconnaissance du sol est qu'elle se déroule en univers incertain; les informations qu'on a à déduire seront aussi d'un univers incertain et tout le processus de prise en compte du sol relevera de cet univers incertain.

Nous présentons dans le chapitre 3 cet aspect du problème.

### 1.2.2 Les utilisateurs

Tous les intervenants utilisent au moins en partie, des informations sur le sol; ils ont intérêt à avoir une base d'informations qui leur soit commune.

Le maître d'ouvrage doit avoir les informations pour une réponse qualitative d'aide à la décision; il lui faut une base commune sol-terrain-environnement de la parcelle.

Le maître d'oeuvre a besoin d'une modélisation continue du sol pour pouvoir simuler sur toute la parcelle et non seulement aux points de reconnaissance; de plus il doit pouvoir associer un risque à chaque variante; enfin il veut avoir une information adaptée à son langage, au problème technique qu'il résout, pouvoir traiter des informations cohérentes et arbitrer entre des choix possibles.

Le BET veut pouvoir mesurer le risque et apprécier l'impact d'une décision favorisant le choix technique par rapport à d'autres préoccupations (architecturales, thermiques,...)

L'entreprise ne connaît le sol qu'au moment de l'ouverture des fouilles et court le risque d'avoir à modifier sa solution à la dernière minute; elle a donc intérêt à disposer de l'ensemble des informations sur le sol tout au long du projet.

Dans le chapitre 2, nous évoquerons le rôle de la CAO (pour une approche globale) de la prise en compte du sol pour les problèmes techniques et pour une mise à disposition des informations à plusieurs intervenants.

Cette pratique est souvent manuelle, parfois partiellement automatisée.

### **1.3 CONCLUSION**

La construction d'un ouvrage sur un terrain donné est le résultat d'un long processus de consultations, de conception et d'études, durant lequel plusieurs utilisateurs vont apporter leurs savoir-faire, effectuer des choix et prendre des décisions.

Dans ce contexte, nous avons montré l'intérêt de la connaissance du sol pour tous ces utilisateurs (maître d'oeuvre, ingénieur, technicien,...).

En d'autres termes la conception de projets d'infrastructures nécessite un échange d'informations communes sur le sol selon les intervenants, mais avec des visions différentes relatives aux fondations, aux réseaux,...

---

## **CHAPITRE 2 : LE CONTEXTE CAO**

### **2.0 PRESENTATION**

Nous avons placé au chapitre 1.2 le problème de la prise en compte du sol dans le contexte d'une aide à la conception automatisée des projets d'infrastructures et d'une mise à la disposition à tous les utilisateurs des informations communes sur le sol; le préalable à toute nouvelle étude est de recenser l'existant dans le domaine.

Les outils informatiques que nous présentons ici sont ceux utilisés ou susceptibles de le devenir dans le contexte de la conception en génie civil; nous les regroupons sous le terme de techniques et outils avancés de la CAO.

L'objectif de ce chapitre est de faire un bilan des techniques informatiques avancées et de leurs applications en génie civil.

Ce bilan nous permettra au chapitre 4 de proposer une plateforme de développement et d'implémentation.

Ces dernières années ont été marquées par l'émergence d'un nouveau mode de formalisme de représentation de la connaissance, celui des langages orientés objets; plus qu'une représentation nouvelle des données, ce formalisme porte en lui une méthodologie originale d'analyse pour des petits problèmes [MEYER, 90].

Les progrès réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle, des systèmes experts avec la capacité qu'ils offrent à prendre en compte les règles du savoir faire -, et de la représentation des connaissances grâce au formalisme orienté objets, laissent penser que les systèmes à base de connaissances sont aptes à mieux aider le concepteur.

Même si les applications effectivement rentables sont peu nombreuses dans le domaine du génie civil [AZIBI et al, 88], l'apport des systèmes à base de connaissances constitue une aide précieuse et indispensable aussi bien pour le diagnostic que pour l'optimisation et la prise de décision.

### **2.1 LES TECHNIQUES INFORMATIQUES AVANCEES**

Nous ne présentons pas ici les outils informatiques classiques mais nous abordons directement les outils plus récents tels que ceux basés sur les langages orientés objets,...

La notion d'objet est une notion très large qui peut être appliquée à différentes catégories d'outils informatiques depuis les systèmes de gestion de base de données jusqu'aux générateurs de systèmes experts en passant par les langages de programmation.

#### **2.1.1 Les Systèmes de Gestion de Base de Données (SGBD)**

Dans notre problème, la gestion des données sur le sol est un problème central; nous présentons les principes de deux systèmes de gestion de données les plus pertinents dans notre cas (SGBDR et SGBDOO); leur rôle est d'apporter des éléments de réponse au problème de la gestion efficace des données au sein d'une base consultable et modifiable par plusieurs utilisateurs.

Avant de présenter ces deux systèmes de gestion, nous rappelons quelques définitions:

Une **base de données** est un ensemble d'informations structurées et organisées sous forme de fichiers, ayant pour but de faciliter l'accès à une information ou à un groupe d'informations spécifiques.

Un **système de gestion** de base de données est constitué par l'ensemble des programmes permettant la manipulation et la maintenance de la base; il n'est pas dédié à une application spécifique; il est caractérisé par la manière dont il structure les données suivant un modèle [PEPIN, 86], [GARDARIN, 84].

Un SGBD peut être vu comme le noyau d'un système de CAO autour duquel graviteront des modules technico-économiques, des éléments architecturaux, des composants techniques [DUFAU et al, 86].

### *Les SGBD relationnels*

Aujourd'hui, le relationnel est devenu quasiment une nécessité grâce à sa souplesse et ses performances [JAMES et al, 90].

Ces SGBDR nécessitent l'emploi de deux langages, l'un pour exprimer les liens entre les données (SQL par exemple), l'autre pour écrire les programmes qui traitent ces données (langage de programmation : C, FORTRAN,...).

Parmi les SGBDR les plus utilisés, on peut citer : INFORMIX, ORACLE, INGRES, DB2,..

Le SGBDR Oracle est doté d'une interface SQL interactive, dispose d'outils de développement et autorise des interfaces avec des langages de programmation classiques (C, FORTRAN,...).

Nous donnons des exemples d'utilisation de création de table et requête:

- Création de la table des essais à la boîte de cisaillement:

```
CREATE TABLE Boite
  (numéro_essai Number (3) NOT NULL,
  Profondeur_de_prelevement Number (5),
  Type_essai Char (25),
  Cohesion Number (5),
  Angle_Frottement Number(3),
  numéro_couche Number (3));
```

- Sélection de la cohésion et de l'angle de frottement de tous les essais réalisés à la boîte de cisaillement:

```
SELECT Cohesion, Angle_Frottement
FROM Boite;
```

### *Les SGBD Orientés Objets (SGBDOO)*

Dans un SGBDOO, le modèle de données supporte les objets complexes par la définition des notions de "classe", d "instance", de "type" et d "héritage".

Les systèmes de gestion de base de données orientés objets qui sont évoqués ci-dessous sont tirés principalement de Castelliani [CASTELLIANI, 91]; on distingue trois types de SGBDOO:

- des extensions de SGBD relationnels:

POSTGRES dérivé du SGBD INGRES,  
SABRINA-objet,

...

- des ateliers de développement dans le contexte de langage objet :

GEMSTONE : permet de développer en Smalltalk 80,  
OB2 : système conçu à partir de C++,  
ONTOS : succède à Vbase, il permet de développer en C++,

....

- des systèmes objets spécifiques:

GBASE développé à l'Université de Compiègne,  
ITASCA développé à partir du prototype ORION-2,  
OBJECTIVITY,  
O2,

Nous présentons le SGBDOO O2 qui nous parait le plus prometteur mais qui est encore au stade de prototype de développement; il est doté d'un environnement de programmation complet et d'outils d'interface homme-machine; il dispose d'un langage de définition des données, d'un langage de requêtes et offre les services classiques d'un SGBD [BANCILHON et al, 89]. L'exemple précédent serait reformulé avec O2 comme suit:

```
CLASS Boite
    type tuple(numéro_essai    : integer,
              Profondeur_de_prelevement : real,
              Type_essai      : string,
              Cohésion        : real,
              Angle_Frottement : real,
              numéro_couche   : integer)
```

## 2.1.2 Les Langages Orientés Objets

La forme même de notre problème nous a conduit à retenir une approche orientée objet par opposition à une approche algorithmique traditionnelle; pour faciliter la lecture de la suite du rapport nous précisons ici les principales caractéristiques des langages orientés objets.

Les notions exposées dans cette partie sont issues des ouvrages de références suivants [BAILLY et al, 87], [MASINI et al, 89].

### fondements du langage

La programmation orientée objet est un paradigme de programmation dont nombreux sont ceux qui affirment qu'il est la réponse actuelle à certains problèmes de génie logiciel et d'intelligence artificielle.

En fait, la programmation orientée objet a avant tout l'avantage remarquable de permettre de maîtriser la complexité et, par conséquent de faciliter la réutilisation des logiciels [HANROT, 88].

La programmation orientée objet structure une application en terme d'objets plutôt qu'en terme de procédures.

### entités de base

Trois grandes familles apparaissent, chacune privilégiant un point de vue sur la notion d'objet:

- le point de vue structurel: (**classe**),

L'objet (classe) est un type de données, qui définit un modèle pour la structure de ses représentants physiques et un ensemble d'opérations applicables à cette structure.

- le point de vue conceptuel: (**frame**),

L'objet (frame) est une unité de connaissances, représentant le prototype des entités que l'on veut représenter.

- le point de vue acteur: (**acteur**),

L'objet (acteur) est une entité autonome et active, qui se reproduit par copie.

**Les langages hybrides** sont une composition des deux ou trois points de vue cités plus haut [MASINI et al, 89], [BULL, 89].

### exemples d'utilisation de ces concepts

Pour donner un aperçu de ce paradigme, nous allons définir les concepts de **classe**, **d'instanciation**, **d'héritage** et de **communication**; pour chacun d'eux, nous donnerons un exemple issu de notre analyse.

**Classe** : c'est une famille d'objets ayant même structure et même comportement.

Structure : c'est la composante statique (**données**).

Comportement : c'est la composante dynamique (**méthodes**).

Les méthodes manipulent les champs (ou données).

```
Class : Boite
      -- numéro : ()
      -- profond_preleve : ()
      -- type essai : ()
      -- cohésion : ()
      -- angle_frottement : ()
      -- numéro_couche : ()
```

Une **instance** est le représentant physique d'une classe.

```
Boite : boîte_1
      -- numéro : 1
      -- profond_preleve : 4
      -- type essai : CD
      -- cohésion : 40
      -- angle_frottement : 10
      -- numéro_couche : 1
```

**L'héritage** : c'est un mécanisme destiné à l'économie des systèmes. La programmation orientée objet préconise de décomposer les systèmes et de minimiser leurs parties communes; en effet, nombre de propriétés sont partageables entre les diverses classes d'objets d'un système.

Supposons que la classe "Boite" a comme super-classe "Essai\_labo" caractérisé par la date et le nom de l'opérateur dont héritera "boîte\_1".

```

Class : Essai_lab0
      -- date : ()
      -- opérateur : ()

Class : Boite
      Super : Essai_lab0
      -- numéro : ()
      -- profond_preleve : ()
      -- type essai:()
      -- cohésion : ()
      -- angle_frottement : ()
      -- numéro_couche : ()

Boite : boite_1
      -- date : 22 10 91          <-- hérité d'Essai_lab0
      -- opérateur : Lmh         <-- hérité d'Essai_lab0
      -- numéro : 1
      -- profond_preleve : 6
      -- type essai: CD
      -- cohésion : 22
      -- angle_frottement : 30
      -- numéro_couche : 1

```

Une classe est une spécialisation d'une autre classe appelée sa super-classe dont elle a hérité des attributs et des méthodes.

**La communication:** elle est un mécanisme destiné à la régularisation des échanges. La programmation orientée objet nous propose des composants élémentaires dont les interfaces sont réduites et dont les communications doivent être contrôlées. Elles se font par envois de messages.

Sur l'exemple suivant, on envoie un message qui déclenche la méthode `New`; cette dernière crée une instance de la classe `Boite` appelée `essai1`:

(<--	Boite	New	'boite_1)
	objet à qui on envoie le message	nom de la méthode	les arguments sur lesquels la méthode s'applique

### 2.1.3 Les Systèmes Experts (SE)

La connaissance des concepteurs qui prennent en compte le sol est souvent mal formulée, empirique, incertaine; les systèmes experts semblent donc un outil a priori bien adapté à notre problème.

#### fondement des systèmes experts

Simuler le raisonnement humain concernant un champ d'expertise donné, tel est le rôle des logiciels appelés "systèmes experts"; ils ont pour objectif principal d'assister l'homme dans les

mécanismes déductifs devant s'opérer sur de gros volumes de connaissances; ces logiciels utilisent les capacités de stockage et les puissances de traitement des ordinateurs, plus fiables.

#### composants d'un système expert

il comprend deux parties essentielles [BRIAND, 88]:

- une base de connaissances incluant la base de faits et la base de règles,
- un moteur d'inférence, qui définit non pas un traitement mais une façon de raisonner sur la base de connaissances.

La base de règles est le "savoir faire" de l'expert, exprimé sous forme de règles de production:

<b>SI</b>	<condition (s)>	<b>ALORS</b>	<conclusion(s)>
SI	cohésion = 0	ALORS	type_sol = pulvérulent

Le moteur d'inférence répond à trois caractéristiques dans son fonctionnement:

- mode de chaînage (avant, arrière, mixte)
- type de logique (formelle, floue,...)
- ordre de logique (0, 0+, 1, ...)

#### **2.1.4 Les Générateurs de Systèmes à Base de Connaissances (GSBC)**

Notre problème relève de l'analyse orientée objet et met en oeuvre des règles de production; les systèmes à base de connaissances semblent donc être des réponses pertinentes.

##### fondements des systèmes à base de connaissance

Davantage que dans l'approche classique des systèmes experts, on tend aujourd'hui dans l'approche orientée objet à comprendre et à mieux représenter l'univers pour en retrouver la logique; ce souci se traduit au niveau de la représentation des objets et de la stratégie de résolution des problèmes [GALLOUIN, 88].

Les générateurs de systèmes à base de connaissances sont réalisés à partir du couplage d'un langage orienté objet et d'un système de gestion de règles de production; le langage permet de modéliser les connaissances complexes du domaine.

Le formalisme des règles de production sert à définir les stratégies de raisonnement sur l'application.

L'originalité des SBC par rapport aux systèmes experts traditionnels est de séparer réellement les données et les traitements.



## 2.2 LES SYSTEMES DE CAO

Notre approche de la prise en compte du sol est celle du contexte global de la CAO: mettre à la disposition du concepteur l'ensemble des aides (infographie, optimisation, aide à la décision, règles de production,..) lui permettant de concevoir et de gérer des objets infrastructures de meilleure qualité.

### historique de la CAO

Les premiers apports de la CAO ont été la gestion des informations par les systèmes de gestion de base de données, leur représentation par des modeleurs graphiques, leurs traitements par des outils numériques (éléments finis, optimisation ..).

### entités manipulées en génie civil et leurs précisions

Lors du processus de conception, on manipule des informations géométriques, qualitatives, quantitatives et relationnelles.

Les informations géométriques sont utilisées pour définir la notion d'origine et de positionnement relatif (point, surface, volume,...).

Les informations qualitatives et quantitatives possèdent quant à elles un nombre indéterminé de niveaux (matériau, prix, caractéristiques mécaniques et physiques).

Les informations relationnelles permettent de mettre en rapport les deux autres types d'informations :

- relation *géométrie-géométrie* (exemple: lien entre les coordonnées d'un sondage et la position d'un élément de fondation).
- relation *géométrie-qualité* (ex: géométrie d'une couche et présence d'une nappe ).
- relation *géométrie-quantité* (ex: géométrie d'une couche et portance sous une fondation),

La précision sur les objets manipulés dépend du niveau de conception (Avant Projet Sommaire, Avant Projet Détaillé, Plans d'Exécution des Ouvrages)

Au fur et à mesure que l'on progresse dans les niveaux de conception, la précision des objets augmente et la nécessité de prendre en compte leurs interactions diminue.

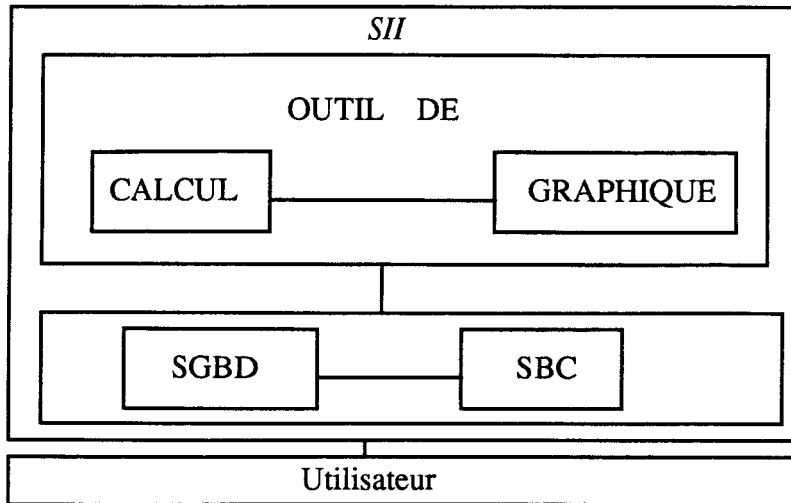
Le problème de communication sera donc plus sensible en phase d'avant projet sommaire qu'en phase de plan d'exécution des ouvrages; c'est en effet à la phase d'APS qu'intervient essentiellement la concertation entre les différents intervenants.

### spécifications des systèmes de CAO en génie civil

Nous rappelons les spécifications d'un système de CAO en génie civil [BOISSIER et al, 91] et leurs correspondances en terme de fonction:

- réunir un ensemble de procédures de traitement concourant à la résolution d'une classe de problèmes spécifiques d'une étape de conception (fonction Calcul, fonction SBC),
- apporter une aide à la construction d'une proposition et à son éventuelle modification pour une amélioration (fonction SBC),
- s'appuyer sur des règles techniques, technologiques, mais aussi relevant de l'expertise (fonction SBC)
- prendre en main tout un ensemble de tâches de manipulation de l'information (fonction SGBD),
- intégrer des programmes spécialisés existants sans reconstruction du système (fonction SII),
- s'adapter au savoir-faire et au mode de travail des divers concepteurs (fonction SBC),
- repérer, sinon proposer des éléments de solutions (fonction SII),
- apporter au concepteur un ensemble de techniques et outils d'évaluation ou de constat de la cohérence de son projet (fonction SBC),

En conclusion, il faudrait étroitement lier les outils adaptés à la résolution de chacune de ces spécifications (fonctions); sans cette liaison et la prise en compte des interactions, on ne peut envisager d'évolution conséquente des systèmes de CAO. Pour notre part, en connaissance des systèmes de CAO classiques, la réponse se situe dans la réalisation d'un système de nouvelle génération appelée "système d'informations intégré"[fig 6].



[fig 6]. Système d'informations intégré

Un système de gestion de base de données pour la fonction gestion, les langages de programmation classiques pour la fonction calcul et le générateur de systèmes à base de connaissances pour la prise en compte du savoir et du savoir-faire des concepteurs.

## 2.3 LES SYSTEMES EXISTANTS EN GENIE CIVIL ET EN ARCHITECTURE

A partir des spécifications du système d'informations intégré défini précédemment, nous avons fait une analyse axée sur les systèmes à base de connaissances et sur les systèmes experts dans le domaine du génie civil; nous faisons un rappel sur certains systèmes classiques.

Nous renvoyons le lecteur à d'autres auteurs qui ont fait un état de l'art en matière de systèmes et logiciels de CAO classiques [DUFAU et al, 86], [ZREIK et al, 88], [DUPAGNE, 89],...

### 2.3.1 Les outils de calcul

Les outils ou logiciels orientés techniques sont très nombreux sur le marché et très spécialisés; ils concernent les phases avancées du projet [MIRAMOND, 81].

Les problèmes traités par ces logiciels peuvent être un ou plusieurs des problèmes de mécanique des sols et d'interactions sols-structures : stabilité, ancrages, simulations d'essais, tassements, consolidations, charges sismiques, ... destinés aux ouvrages tels que: barrages, remblais, plate-forme marines, murs de soutènement,... [HABEJ-BEK, 90].

### 2.3.2. Les systèmes orientés graphique

Plusieurs laboratoires de recherche ont développé leur maquette sur des modeleurs graphiques notamment les architectes (KEOPS, PC-BAT,...) [CRIB, 89].

D'autres s'intéressent à la représentation graphique en tant qu'outil de présentation de résultats [DUFAU et al, 90].

### 2.3.3 Les systèmes de CAO classiques

Nous évoquons les systèmes de CAO à travers X2A : une référence classique dans le domaine de la CAO en génie civil.

X2A est formé d'un ensemble de modules construit autour d'un SGBD; il est capable de gérer des données manipulées par les architectes et les ingénieurs en phase d'avant projet car il intègre des modules de définition architecturale, d'évaluation technique et économique, et de visualisation du projet [DUFAU et al, 86], [MANGIN, 87].

### 2.3.4 Les systèmes experts

Ces dernières années, des systèmes experts sont développés dans de nombreux domaines; impressionnants par leur nombre, ils le sont aussi par la diversité de leurs applications. Aussi pour illustrer la situation, nous avons établi une liste non exhaustive des systèmes experts dans le domaine du génie civil et de l'architecture.

Les systèmes experts du centre scientifique et technique du bâtiment (C.S.T.B.):

le CSTB conduit depuis 1985 plusieurs actions visant à produire des logiciels experts appliqués à des domaines choisis du bâtiment. Il utilise soit son propre générateur de systèmes experts ELSEES (Elaboration de Systèmes Experts), soit des générateurs proposés sur le marché : SMECI (Système Multi-Experts de Conception en Ingénierie),...

Nous présentons quelques unes de ces actions [CSTB, 88]:

THEX 89: aide à la conception thermique de maisons individuelles,

DERM: aide au choix de revêtements de façade,

NOE : Contrôles techniques des projets de bâtiments,

KREPIS: un système d'assistance au projet architectural développé à l'école d'architecture de Toulouse.

Les réalisations de la société DUMEZ :

LOGIBAT: aide à l'estimation du prix d'un projet de logements,

PENELOPE: aide à la planification d'un projet de bâtiments,

FEREX: aide au ferrailage de pièces en béton armé.

Les travaux universitaires :

PROSPECTOR: Aide à la prospection minière cité par Bonnet [BONNET, 86].

CESSOL: Issu d'un prototype universitaire réalisé par Mougins, Mangin et Boissier [BOISSIER et al, 83] CESSOL a été développé par le CRIL (société de conception et réalisation industrielles de logiciels).

CESSOL a pour fonction d'aider à la réalisation d'une campagne de reconnaissance géotechnique, permettant de connaître la nature et les caractéristiques mécaniques des différentes couches d'un terrain sur lequel sera implanté un bâtiment.

Nous nous attardons sur ce système puisque c'est une réalisation en amont de nos objectifs.

Le système expert CESSOL fournit un avis sur le contenu technique de la campagne proposée, un avis qualitatif sur la nature, le type de sondages et d'essais, et un avis quantitatif sur la profondeur et le nombre de sondages et d'essais.

Il commente également les conclusions (l'utilité ou le rejet de certains sondages...).

CESSOL ne permet toutefois ni de dimensionner les fondations, ni de faire une synthèse géotechnique des résultats d'une campagne de sondages et d'essais.

RECOSOL: un didacticiel d'apprentissage de la reconnaissance des sols [AZZOUZ et al, 85].

**X2A-SE:** Au système X2A ont été ajoutées des couches expertes. Ce travail réalisé conjointement entre les laboratoires LGCH, LIA et LMGCU a donné naissance à X2A-SE. L'objectif de ce projet était d'accroître les performances de X2A sur le plan des évaluations techniques et économiques.

Ces couches expertes portent sur la gestion des algorithmes de calcul, sur le dialogue intelligent en saisie, sur la recherche de solutions techniques et l'aide à la gestion des modifications du projet [MANGIN, 87].

Pour finir, nous évoquons quelques réalisations récentes de maquettes de systèmes experts:

EXDIG: un système expert de conception de digues [MONCEYRON, 90]

EXPLAN: un système expert d'aide à la configuration géométrique du plan de masse des ports [MONCEYRON, 90].

SARMECA: un système d'aide à la représentation et la manipulation des éléments de composition architecturale [VEZIN, 90].

GAP: générateur automatique de propositions d'études et diagnostiques des réseaux d'assainissement [PASSARD et al, 91].

ASTRAGALE: maquette d'étude sur l'articulation entre la phase d'esquisse et l'instrumentation du projet d'architecture [GOULETTE, 91].

### 2.3.5 Les systèmes d'informations intégrés

Ce que nous appelons système d'informations intégré renvoie aux spécifications d'un système de CAO en génie civil définies au paragraphe 2.2.

Un exemple de système se rapprochant de la vision que nous nous faisons de ces systèmes est CONCEPTOR; c'est un système multitechnique de conception de bâtiment issu de X2A-SE [DUFAU et al, 90]. Il traite plusieurs niveaux de conception : depuis les phases précoces de conception jusqu'au projet détaillé; il propose des outils d'aide à la conception.

Il est basé sur l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle, notamment celles des systèmes à base de connaissances avec une représentation orientée objet et par règles de production [DUFAU et al, 90].

## 2.4 CONCLUSION

Dans un souci constant d'assister toujours plus le concepteur dans sa démarche, les systèmes de CAO classiques sont de plus en plus efficaces, mais toujours limités.

Les techniques de systèmes à base de connaissances notamment avec la représentation orientée objet apportent davantage de souplesse dans le domaine de la CAO.

De nombreuses équipes travaillent actuellement sur le couplage d'outils dérivés de l'I.A. et d'outils classiques de la CAO.

Ces recherches visent à assister le mieux possible les différents intervenants (ingénieur, bureau d'études, maître d'oeuvre,...) dans leur processus de conception.

A travers ces sources d'intérêts dégagées, de la présentation des outils et des systèmes de la CAO, nous avons mis en valeur la notion de système d'informations intégré; ce système permettra de gérer, raisonner, calculer et éventuellement dessiner.

---

## CHAPITRE 3 : L'INCERTAIN ET LE TRAITEMENT DES DONNEES

### 3.0 PRESENTATION

Nous avons soulevé au paragraphe 1.2 le fait que la prise en compte du sol se déroule dans un processus relevant d'un univers incertain.

Dans ce chapitre nous identifions cet univers et rappelons qu'elles sont les principales approches utilisées pour les modéliser.

La notion de sécurité n'aurait pas de sens s'il n'y avait pas d'incertitude; cependant on doit faire une différence entre les fautes et les incertitudes.

Les fautes concernent essentiellement les actions humaines pendant le calcul et la réalisation; les incertitudes, par contre, apparaissent tout au long du processus de conception, et portent sur les méthodes, les actions, le dimensionnement et sur les caractéristiques de sol.

Le grand nombre et la complexité des lois de comportement, des modes de reconnaissance, des essais en place, des essais de laboratoire, montrent bien que la mécanique des sols n'est pas tout à fait dégagée de l'empirisme, et que nous n'avons pas encore une connaissance rationnelle des phénomènes [FAVRE, 72,80].

Nous renvoyons à d'autres auteurs [FAVRE, 72, 80], [BOISSIER, 82], [MAGNAN, 82],... qui ont effectué une analyse très détaillée sur ce sujet.

Dans ce chapitre nous avons recensé les principales sources d'incertitudes et les méthodes de traitements; notre but à travers cette étude, est de retenir les traitements qui conviennent à notre application.

Nous ne prétendons pas traiter ce problème qui, à lui seul nécessite plusieurs travaux de recherches.

### 3.1 LES SOURCES D'INCERTITUDES SUR LE SOL

L'expérience montre que trop de dégâts recensés sont dus à une mauvaise ou à une absence de campagne de sol, ainsi qu'à de mauvaises interprétations des résultats d'essais [CASSAN, 88], [BOISSIER, 83],...

Ainsi devant des informations souvent disparates et limitées, le rôle de l'ingénieur est de faire des choix raisonnés, argumentés face à la notion de risque généralisé [BOISSIER, 82].

Nous pouvons rappeler [LONDE, 79] que les propriétés des données de tout problème géotechnique présentent:

- une dispersion spatio-temporelle des propriétés des sols,
- une dispersion temporelle des sollicitations,
- une imperfection des valeurs mesurées, liée au nombre limité des essais et des observations réalisés, et aux erreurs expérimentales,
- une imperfection du modèle mécanique employé,
- une grande multiplicité de paramètres de sol,
- un décalage dans le temps entre acquisition des données et utilisation.

Il en résulte, donc que les données disponibles ne pourront jamais représenter qu'une simplification et une approche plus ou moins grossière du problème [CASSAN, 88].

### 3.2 L'ANALYSE DES INCERTITUDES

L'analyse des incertitudes a un double rôle:

- décrire qualitativement les incertitudes que recouvrent tout calcul en géotechnique (incertitudes provenant de la campagne de sol, des essais, des méthodes de calcul).
- caractériser numériquement ces incertitudes, lorsque cela est possible, à partir d'éléments bibliographiques [FAVRE, 72, 80], [CASSAN, 88], [BOISSIER, 83].

Sans vouloir négliger tous les problèmes sus-cités - sur la connaissance des méthodes de représentation de comportement (signification des hypothèses par rapport à la réalité, précision des modélisations,...), -sur la connaissance des phénomènes (eau dans le sol, interface sol-structure,...), les quelques problèmes suivants sont à prendre en compte dans notre travail:

- connaissance des caractéristiques ponctuelles d'un paramètre, par la détermination des relations entre le nombre d'essais et la qualité de la connaissance et par la détermination des corrélations entre ce paramètre et d'autres paramètres,
- connaissance des caractéristiques spatiales d'un paramètre, c'est-à-dire de la variabilité spatiale de ces caractéristiques et de l'influence de cette variabilité sur la stabilité,
- connaissance des caractéristiques des paramètres en place, ce qui revient à déterminer la qualité des sols mis en place.

### 3.3 LES APPROCHES DE L'INCERTAIN

Chacune de ces causes principales a fait et continue de faire l'objet de nombreuses recherches systématiques qui ont un grand intérêt notamment pour une connaissance très fine du comportement de différents types ou classes de sols; citons à titre d'exemple, les travaux du groupe GRECO-Géomatériaux.

Le raisonnement et les méthodes statistiques et probabilistes se sont étendus dans des secteurs variés des sciences de l'ingénieur.

L'approche probabilité-statistique s'est considérablement développée depuis une trentaine d'années et a donné naissance à de nombreuses études sur les corrélations, sur la variabilité naturelle des paramètres de sol,...

Cette approche est actuellement devenue un outil important de la géotechnique notamment avec l'introduction de la géostatistique [GUILLAUME, 77].

L'usage de techniques statistiques, qui trouvent leur fondement et leur justification dans le calcul des probabilités, s'est plus difficilement répandu dans le domaine du génie civil pour un ensemble de raisons [FAVRE, 72, 80], [BOISSIER, 82,83], [MAGNAN, 84], [CASSAN, 88],...

En effet de grosses difficultés apparaissent lorsque l'on veut appliquer à la connaissance du sol les notions de l'approche probabiliste:

La première difficulté repose sur la compréhension du sol; pour connaître un sol, il faudrait l'avoir examiné entièrement.

A la connaissance du sol, s'ajoute donc automatiquement une incertitude statistique provenant du nombre réduit d'essais.

Il s'y greffe aussi une incertitude stochastique : que va devenir le sol au cours du temps (chargement, tassement, arrivée d'eau,...) et comment varie-t-il dans l'espace (hétérogénéité, anisotropie,...)?

La deuxième repose sur les modèles de représentation du sol (hypothèses, caractères et paramètres représentant le sol,...).

Enfin le dernier écueil est commun à tous les secteurs où l'on introduit les calculs probabilistes; les méthodes et concepts nouveaux paraissent hermétiques et surtout difficiles à utiliser pour le projeteur [BOISSIER, 83].

Depuis la fin des années soixantes, de nombreuses publications ont été consacrées à l'utilisation de cette approche pour étudier les différents problèmes relatifs aux données et aux méthodes de la mécanique des sol.

Les principales manifestations internationales sur le thème de l'utilisation de cette approche en structure et en géotechnique sont les congrès ICASP (International Conference on Applications of Statistics and Probability on engineering) et la session spécialisée dans les congrès ICSMFE (International Congress on Soil Mechanic and Foundations Engineering).

### **3.4 LES METHODES DE TRAITEMENT**

Nous présentons les techniques statistiques et probabilistes utilisées dans les méthodes de résolution des problèmes de sol.

La théorie des probabilités permet principalement de calculer la probabilité d'existence d'événements sur lesquels on ne dispose que d'informations partielles; en pratique il est rarement possible de faire des essais sur tous les échantillons.

Etant donné l'hétérogénéité des sols et les sources d'erreurs liées à l'échantillonnage et aux méthodes d'essai, il est normal qu'il y ait des écarts entre les résultats d'essais exécutés sur des échantillons apparemment tous représentatifs et entre les échantillons et leur population.

C'est la raison d'être des études statistiques.

Elles permettront de délimiter le degré d'incertitude sur les résultats d'essais et de trouver la valeur numérique de leur degré de fiabilité.

#### **3.4.1 Les méthodes statistiques et géostatistiques**

Les techniques statistiques permettent selon une succession bien définie de déterminer [FAVRE, 72, 80], [MAGNAN, 82]:

- des moyennes et des écarts types,
- de rechercher la forme des lois de répartition des paramètres (théorie de l'estimation) et de tester leur signification (tests statistiques).

L'estimation permet de déterminer les meilleurs valeurs de paramètres d'une loi donnée : elle suppose qu'on a choisi au préalable la forme de la loi que l'on veut ajuster aux données expérimentales.

Les méthodes d'estimation disponibles et utilisées dans le domaine de la mécanique des sol sont développées par Magnan [FAVRE, 72, 80], [MAGNAN, 82] et Harr [HARR, 81]; ces quatre documents constituent les éléments de base des probabilités statistiques et de la géostatistique en mécanique des sol. Ces techniques servent à déterminer par exemple:

- la distribution des propriétés des sols,
- les corrélations,
- la variabilité spatiale.

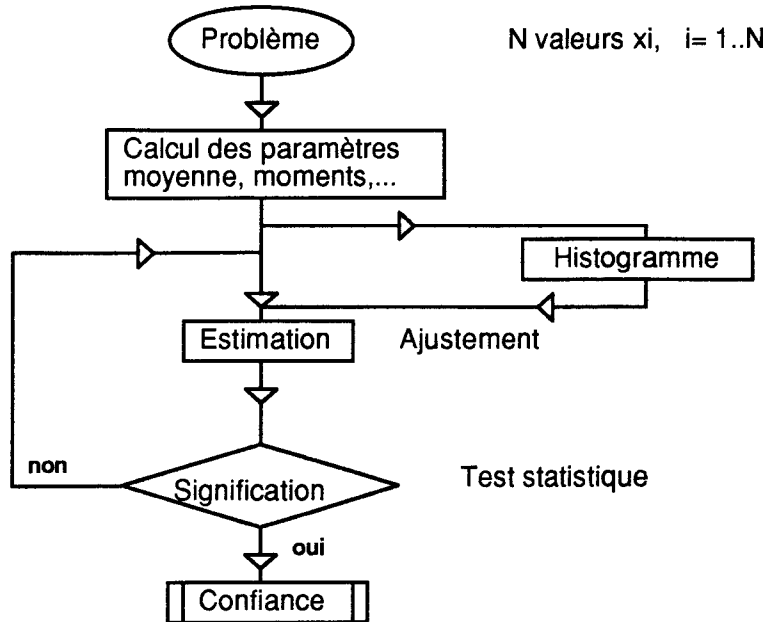
Nous allons détailler ces différentes techniques:



## La distribution des propriétés

- la distribution des propriétés des paramètres de sol (le cheminement classique utilisé pour étudier la distribution sont: moments empiriques, histogramme, lois de distributions théoriques, méthode des statistiques ordonnées, tests statistiques,...).

Le cheminement de l'étude de la distribution est représenté sur la figure 2.



[fig 2]. Organigramme de l'étude

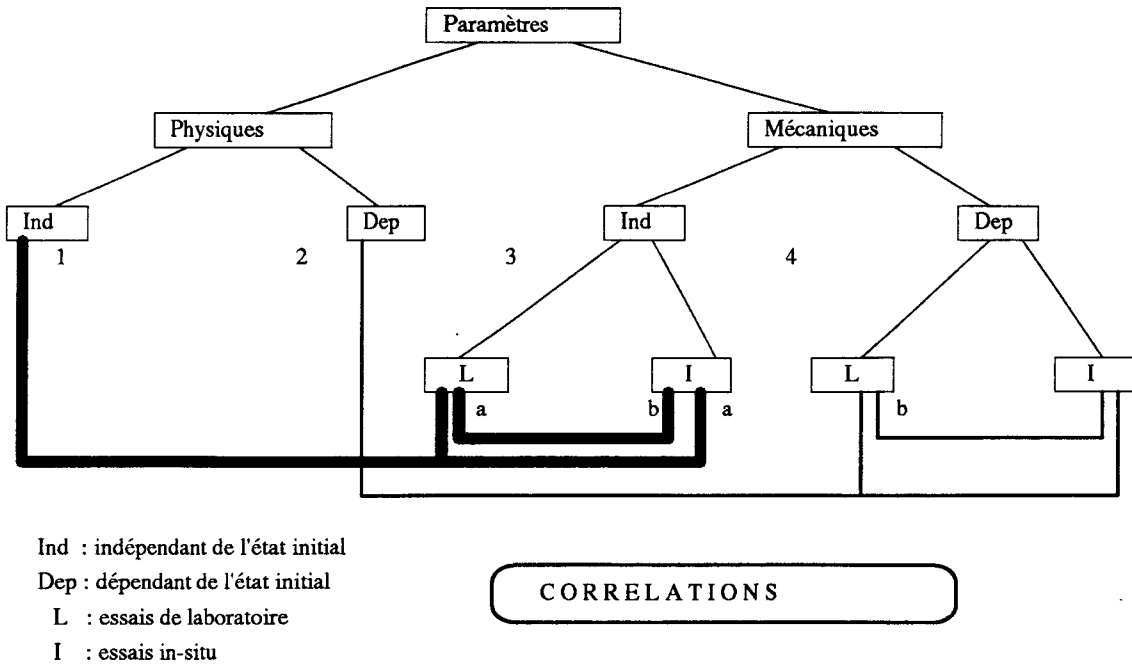
## Les corrélations

les corrélations entre les paramètres de sol (on utilise l'ajustement linéaire pour corrélérer deux paramètres; pour plusieurs paramètres on utilise telles que l'analyse de régression multiple, l'analyse factorielle,...),

L'analyse de régression multiple est utilisée pour les corrélations entre une variable et un groupe de plusieurs autres variables.

L'analyse factorielle permet de grouper les valeurs ou de grouper les spécimens suivant les besoins.

Nous résumons sur ce graphe les liens de corrélations entre paramètres dépendants et indépendant de l'état initial [fig 3].



[fig 3]. Corrélations entre paramètres de sol

Il est bien entendu par ailleurs que des corrélations ne pourront être établies qu'entre caractéristiques physiques ou mécaniques ayant le même degré de dépendance vis à vis de l'état initial. [VAN WAMBEKE, 74], [BIAREZ et al, 76, 89] [fig 4].

**Quelques exemples de corrélations :**

1	2	3		4	
		a	b	a	b
caractéristiques minéralogiques granulométriques WL, Wr, Wp Ip, Wopn	$\gamma$ W IL %proctor	Cr $\phi^r$ Cc *	pl qd Cr (Scissom.)	Cc **	Module pressio vierge  Cu (Scissom.)

\* Partie finale      \*\* phase initiale

[fig 4]. Exemples de corrélations entre paramètres de sol

**La variabilité spatiale**

La variabilité spatiale des propriétés de sol (initialement cette variabilité a été étudiée par les méthodes statistiques classiques; depuis quelques années, une nouvelle méthode a été développée pour l'étude des variations spatiales par Matheron [AZZOUZ et al, 91].

Cette méthode baptisée géostatistique dont l'outil fondamental est le variogramme permet de caractériser la structure de la variabilité spatiale du phénomène régionalisé [GUILLAUME, 77] BOUHERAOUA, 89].

La connaissance du variogramme permet d'aborder deux classes de problèmes: l'étude de l'estimation -théorie du krigeage- et celle de la fluctuation -théorie des simulations.

Le variogramme: variabilité des propriétés du sol autour d'un point donné de l'espace.

Les méthodes de krigeage: estimer les variations probables des propriétés du sol entre les points où on les a mesurées.

#### Dérive et autocorrélation

Initialement, on décompose les variations observées de chaque propriété en une fonction déterministe des coordonnées du point de mesure dans l'espace appelée dérive et une composante aléatoire de moyenne nulle.

Un phénomène est régionalisé, s'il se déploie dans un espace E et y montre une certaine structure [GUILLAUME, 77].

Une variable  $Z(x)$  est dite régionalisée si elle désigne la valeur en un point X de E, d'une caractéristique du phénomène régionalisé.

En géotechnique, l'espace de régionalisation est un profil, une surface ou un volume suivant que les observations sont faites à une ou plusieurs dimensions.

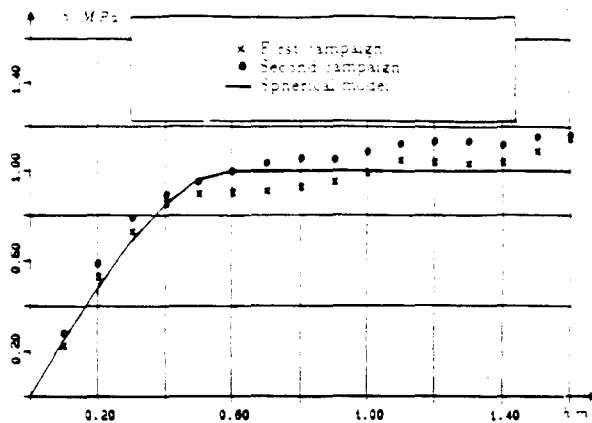
$$Z(x,y,z) = P(x,y,z) + U(x,y,z)$$

$Z(x,y,z)$ : décomposition d'une variable,

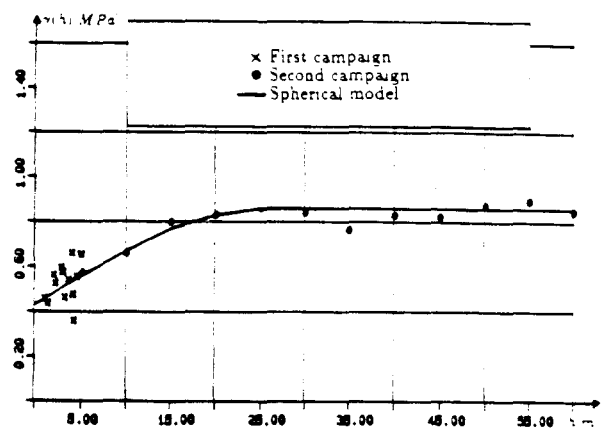
$P(x,y,z)$ : fonction déterministe qui décrit les variations de la valeur moyenne dans l'espace; (effet des phénomènes qui ont influencé la formation du sol pendant de longues périodes).

$U(x,y,z)$ : variable aléatoire de moyenne nulle en chaque point; (elle traduit les fluctuations de courte durée des conditions de formation du sol).

Un exemple complet de l'utilisation de la fonction d'autocorrélation est développé dans le livre de Magnan [MAGNAN, 82]; par contre les fondements théoriques des variables régionalisées sont développés dans le livre de Guillaume [GUILLAUME, 77]; il constitue le document de base de l'étude de la géostatistique. Nous présentons quelques variogrammes [fig 5].



Vertical variogram of CPT data on a sandy clay layer.



Horizontal variogram of CPT data on a sandy clay layer.

[fig 5]. Quelques recueils de variogrammes [AZZOUZ et al, 91]

### 3.4.2 Les méthodes d'interpolation et d'approximation

Notre but à travers l'utilisation de ces méthodes est de pouvoir modéliser la géométrie d'un terrain pour les travaux de terrassement, pour la préparation des cotes de plates-formes, et de pouvoir estimer quasiment en tout point de l'espace la valeur d'une fonction qui n'est connue qu'en certains points de mesures.

Nous nous proposons de passer en revue quelques méthodes parmi les plus utilisées; celles ci sont regroupées en deux classes:

- les méthodes d'interpolation (Lagrange, Tchebycheff, polynomiales de Newton, fonctions splines, polynomiales par morceaux, méthode de Bézier,...)
- les méthodes d'approximation (méthode de moindre carré, au sens de Tchebycheff, fonctions splines de lissage, fonctions de Bézier,...)

A travers le recensement de ces méthodes classiques et l'étude de leur domaine d'application, nous constatons que ces méthodes ne prennent pas en compte l'incertitude sur les paramètres de sol; bien souvent, un type de méthode est proposé pour un problème donné sans associer l'utilisateur.

Nous relevons à travers cette étude un intérêt pour les fonctions splines cubiques pour l'interpolation et la méthode de Bézier pour le lissage des courbes.

En ce qui concerne la modélisation (géométrique et numérique) du sol, la méthode des variables régionalisées constitue un très bon outil d'interpolation et d'approximation puisqu'elle permet de [GUILLAUME, 77]:

- calculer en tout point la valeur la plus probable des cotes recherchées et de chiffrer la précision de l'interpolation,
- prendre en compte la variabilité spatiale du phénomène.

### 3.5 SYNTHÈSE SUR LES MÉTHODES

sur les incertitudes liées aux paramètres de sol:

- la voie qui nous paraît la plus intéressante pour le moment est celle de l'utilisation des banques de données géotechniques; ces données doivent être prétraitées par des experts en géotechnique, avant leur stockage dans des banques de données [LEMAIRE, 76], [LETELLIERS, 81], [DYSLI et al, 86], [FAVRE et al, 91]<sup>1</sup>.

L'approche probabilité-statistique ne se révèle pas très satisfaisante car elle a besoin d'une énorme masse de calculs et n'est efficace que sur des grandes quantités de populations; et de ce fait, elle est intéressante pour le traitement de banques de données.

Pour la modélisation (géométrique et numérique) du sol, la méthode des variables régionalisées constitue un très bon outil d'interpolation et d'approximation puisqu'elle permet de prendre en compte les incertitudes.

L'approche possibiliste que nous n'avons pas utilisée sera une des voies les plus prometteuses de la prise en compte de l'incertain pour la prise de décision. [DUBOIS et al, 85]

La modélisation floue des préférences semble être une voie de réponse à la mise en place d'une méthode permettant d'intégrer l'incertitude sur les données et la décision de l'utilisateur [AL-HAJJAR et al, 91].

Nous avons retenu pour notre travail:

- l'utilisation des corrélations entre les différents paramètres du sol,
- l'approche statistique classique pour quantifier l'incertitude sur la variabilité des propriétés du sol.

### 3.6 CONCLUSION

Dans le processus de conception et de production d'un ouvrage, et notamment aux premiers stades, les informations sont peu nombreuses et imprécises; le concepteur raisonne, induit et procède par analogie.

Il en résulte donc que ces informations représentent une simplification et une approche plus ou moins grossière de la connaissance du sol.

Pour pallier à cet état de fait, les chercheurs tentent de proposer d'autres approches que celles de l'univers purement déterministe.

Nous avons présenté les différentes sources d'incertitudes liées aux projets d'infrastructures dans le but de les analyser et de trouver des solutions qui puissent nous aider dans leur prise en compte. Cela nous permettra d'expliquer les variations d'une caractéristique du sol d'un point à l'autre et d'associer une incertitude (ou une confiance) aux mesures obtenues.

L'usage des corrélations nous a paru une voie intéressante à intégrer dans notre travail; à cet effet nous avons établi une liste de paramètres corrélables qui seront décrits partiellement au chapitre 3 de la deuxième partie.

---

## **CHAPITRE 4 : CAHIER DES CHARGES D'UN SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES POUR LE SOL**

### **4.0 PRESENTATION**

Compte tenu des spécificités du sol et des projets d'infrastructures et d'une analyse critique sur les outils informatiques existants, nous allons définir dans ce chapitre nos objectifs, le cahier des charges et notre proposition.

### **4.1 CONSTAT**

Le premier volet de ce constat concerne le sol et les projets d'infrastructures.

Dans tout projet d'infrastructures, le paramètre **sol** doit être pris en considération, soit pour constater que ce paramètre ne pose pas de problèmes particuliers, soit pour poser correctement les problèmes géotechniques et envisager les mesures propres pour les résoudre.

Les conséquences néfastes du comportement du sol environnant peuvent être évitées en prenant des mesures adaptées lors de la conception et lors de la réalisation.

Les problèmes liés à la conception et à la réalisation de l'adaptation au sol sont caractérisés essentiellement par les faits suivants:

- les données sont incertaines: l'information est souvent incomplète, imprécise, inadaptée au problème ,
- la connaissance du sol est ponctuelle puisque les essais sont généralement locaux et peu nombreux ,
- les acteurs différents utilisent des données communes.

Le deuxième volet concerne les outils informatiques existants sur le marché ou en cours de développement dans les laboratoires.

Connaissant les limites des langages et utilitaires classiques, nous les avons écartés rapidement; nous nous sommes plutôt focalisé sur l'analyse des outils les plus récents à savoir les SGBDR et les systèmes à base de connaissances notamment à travers le couplage des SE et des LOO; ces derniers semblent davantage répondre à nos préoccupations et ont déjà fait l'objet d'étude dans des systèmes de CAO orientés architecture.

### **4.2 OBJECTIFS**

Notre travail s'inscrit dans une contribution à l'objectif ambitieux d'une modélisation continue du sol pour une meilleure adaptation au sol des projets d'infrastructures. Notre contribution peut alors s'exprimer en terme de sous-objectifs de cette objectif maître qui sont:

- de proposer des axes pour réaliser une modélisation quasiment continue du sol
- en amont de cette préoccupation, de rendre cohérentes et d'élaborer les informations brutes en provenance d'une campagne de reconnaissance de sol; la part d'incertitudes sur les informations brutes étant importante nous voulons porter nos efforts sur la réduction des incertitudes, à plus long terme les estimer pour intégrer la qualité de l'information dans la prise de décision

- en aval, de mettre à la disposition des différents intervenants et applications techniques spécialisées des données élaborées sur le sol. Parmi ces applications nous comptons utiliser dans un premier temps les applications existantes au laboratoire (application concernant les terrassements et les fondations).

### 4.3 CAHIER DES CHARGES

Notre premier travail a consisté à étudier les processus de conception des infrastructures afin de repérer les informations sur le sol communes aux différentes études techniques sur un même site (terrassement, fondation,...) et afin de définir le cahier des charges répondant à nos objectifs; ce cahier des charges consistent à:

- établir les traitements permettant de passer de données brutes à des données cohérentes et mettre l'accent sur les traitements réduisant les incertitudes et les prenant en compte,
- mettre en place une méthode qui permette à partir des données d'une campagne de sol d'arriver à la connaissance des caractéristiques du sol quasiment en tout point,
- proposer une structure qui permette la mise à disposition des informations communes à tous les intervenants et leur exploitation par différentes applications techniques d'infrastructures (terrassement, fondation, ...)

### 4.4 PROPOSITION

Ce cahier des charges nous conduit à proposer une base d'informations commune, intégrable dans un système de CAO, exploitable pour tous les projets d'infrastructures, pour différents niveaux de conception et par différents acteurs.

Des procédures de traitements des informations brutes doivent être associées à cette base; cette base doit pouvoir être couplée avec des logiciels techniques existants; il doit être possible d'enrichir progressivement la base, au fur et à mesure de l'acquisition des connaissances et de réutiliser les connaissances traitées pour une nouvelle application (vérification sur des cas de sol contenus dans la base par exemple).

Ce type de réalisation entre dans la problématique générale du développement d'un Système à Base de Connaissances pour la prise en compte du savoir faire propre au domaine de la géotechnique et l'utilisation d'un Système de Gestion de Bases de Données Relationnelle pour assurer la fonction gestion des données sur le sol.

---

## **CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE**

Nous avons exposé dans cette première partie le problème posé par le sol, les aides informatiques actuelles et les méthodes de traitement des incertitudes.

Le problème posé au concepteur est complexe, car il lui faut intégrer et concilier des techniques très diverses et des préoccupations souvent contradictoires, gérer l'évolution des objets dans le temps.

Pour assurer cette tâche, les concepteurs disposent de très peu d'outils informatiques (logiciels, guides, méthodologies) pendant la phase préliminaire d'élaboration du projet alors qu'il y en a davantage pour l'analyse détaillée (modélisation mathématique, calcul de structure,...).

Ils sont également amenés à manipuler des informations symboliques et qualitatives, que ne prennent pas en compte ces algorithmes numériques classiques.

Devant la complexité du problème il ne s'agit pas de s'attaquer au processus de conception dans sa globalité, mais plutôt de bâtir un système sur le sol qui accepte la modularité, offrant au concepteur un certain nombre d'outils automatisant chacun une partie de la conception des infrastructures, et l'assistant dans ses différentes tâches durant le projet.

Les systèmes d'informations intégrés semblent à priori aptes à répondre à ces différentes attentes des concepteurs.

---



## **PARTIE II**

### **LES ELEMENTS DE REPONSES**

## INTRODUCTION

Nous avons montré dans la première partie l'intérêt d'avoir un noyau d'informations commun à différents intervenants pour les études de projets d'infrastructures.

Devant la complexité du problème, il ne s'agit pas de s'attaquer à sa résolution immédiate sans avoir analysé et structuré le domaine en tenant compte de plusieurs facteurs tels que l'exhaustivité et la généralité de l'approche, les limites et les hypothèses sur le domaine, la modularité et la pérennité du système...

Le développement d'un système informatique s'apparente à la construction d'un immeuble; en effet, avant de construire, il faut concevoir, définir, évaluer et valider des plans; de la même façon, avant de réaliser un système d'information, il faut complètement le concevoir et le définir, c'est à dire le spécifier dans ses grandes lignes comme dans tous ses détails [ROLLAND et al, 87].

La première étape dans la conception d'un système d'information consiste à adopter une méthode de développement qui est partie intégrante des moyens de construction de systèmes performants.

Les méthodes de développement sont indispensables pour répartir le travail dans le temps et aider à la formalisation du problème; elles sont basées sur le formalisme graphique et textuel qui constitue le support de communication le mieux adapté.

Elles permettent aussi d'éviter la redondance des informations et sont un support précieux du raisonnement.

En particulier, la méthode que nous avons adopter va nous guider pour modéliser toutes les informations et les traitements associés.

Dans le premier chapitre nous présentons les deux grandes familles actuelles de méthodes de développement de systèmes; leur analyse nous permet de sélectionner la méthode qui apparait la plus opérationnelle pour notre problème.

L'objet du deuxième chapitre concerne la modélisation des objets du sol.

Nous présentons les différents types d'information donnés par la campagne de sol et leur organisation.

A partir des hypothèses décrites, nous précisons les limites de cette modélisation.

Au troisième chapitre, nous analysons les traitements associés aux différents objets issus de notre modélisation.

Nous décrivons les différents traitements associés, leur intérêt et leurs limites.

Enfin, au quatrième chapitre, nous présentons l'implémentation de la maquette système à base de connaissances sur le sol (KBSOL).

## CHAPITRE 1 : ELEMENTS DE METHODOLOGIE

### 1.0 PRESENTATION

D'une manière générale, les méthodes de développement aident à formuler les questions relatives à:

- la compréhension du problème réel: organisation des informations et utilisation potentielle,
- la prise en compte de l'environnement existant et l'étude de l'impact d'un système d'informations dans cet environnement,
- l'adéquation de la proposition aux besoins des utilisateurs.

Dans le cadre de notre application, nous devons à l'aide d'une de ces méthodes formuler les réponses relatives à:

- la compréhension du problème du partage des données sur le sol entre les intervenants du processus de conception
- l'organisation des informations et des procédures de traitement,
- la connexion de ce système d'information avec d'autres réponses existantes (systèmes de CAO pour les fondations, module de calcul des cubatures,...)
- l'adéquation de la proposition aux besoins multitechniques des concepteurs.

### 1.1 LA NOTION DE SYSTEME ET DE METHODE

#### 1.1.1 Définition d'un système

Avant de présenter les différentes méthodologies, nous allons rappeler la définition d'un système d'informations (SI) ainsi que ses diverses fonctionnalités.

Le système est un ensemble formé [ROLLAND et al, 87]:

- *de collections de données*, représentations partielles en partie arbitraires mais nécessairement opératoires, d'aspects pertinents de la réalité de l'organisation sur lesquels on souhaite être renseigné,
- *de collections de règles*, qui fixent le fonctionnement informationnel. Ces règles traduisent ou sont calquées sur le fonctionnement organisationnel. Partie intégrante du SI, ces règles doivent être connues des acteurs qui utilisent le SI. Elles leur sont nécessaires pour l'interprétation et la manipulation des collections de données,
- *d'un ensemble de procédés*, pour l'acquisition, la mémorisation, la transformation, la recherche, la communication et la restitution des renseignements,
- *d'un ensemble de ressources humaines et de moyens techniques* intégrés dans un système, coopérant et contribuant à son fonctionnement et à la poursuite des objectifs qui lui sont assignés.

Dans cette perspective, le système est une super mémoire à l'usage des intervenants et des acteurs de l'organisation, capable de les renseigner sur la *situation actuelle* et sur *l'histoire* des faits qui l'ont concerné et qu'il a enregistré.

### 1.1.2 Définition d'une méthode de développement d'un système

Développer un système, c'est mener un ensemble d'activités complexes et variées de décisions et de planifications, d'analyse de la réalité et de recueil de besoins informationnels, de conception et d'évaluation de systèmes, de réalisation, de tests, de mise en place de contrôle qualité qui aboutissent à faire passer le système à réaliser d'une situation initiale de projet, à une situation finale de système concret et opérationnel [REDOUIN, 89].

Le processus de développement d'un système s'organise globalement en deux phases :

- une première phase de conception qui aboutit à la spécification du système sous la forme d'un schéma,
- une seconde phase de réalisation, qui conduit à la réalisation effective du système.

## 1.2 LES DIFFERENTS SYSTEMES

Le concept de système regroupe le système d'informations (SI), le système à base de connaissances (SBC) et le système d'informations intégré (SII).

Tout au long de ce chapitre, le concept système, s'il n'est pas précisé, fera allusion à l'un des trois systèmes sus cités.

## 1.3 LES METHODES DE DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES D'INFORMATIONS

Il n'est pas question ici de définir une classification rigide qui enferme chaque méthode dans un cadre strict, mais plutôt de présenter deux grandes familles de perspectives de conception auxquelles on peut rattacher les méthodes [ROLLAND et al, 87].

Il est possible de dégager deux grandes classes:

- la classe des méthodes cartésiennes,
- la classe des méthodes systémiques.

Ces deux familles correspondent à une évolution chronologique; les méthodes cartésiennes sont issues des méthodes d'analyse qui se sont développées au cours des années 60; les méthodes systémiques sont apparues au moins dix années plus tard.

### 1.3.1 Les méthodes cartésiennes

#### 1.3.1.1 généralités

Les méthodes cartésiennes mettent l'accent sur la démarche (déductive) de conception, c'est à dire sur la façon de conduire et de dérouler le processus de conception.

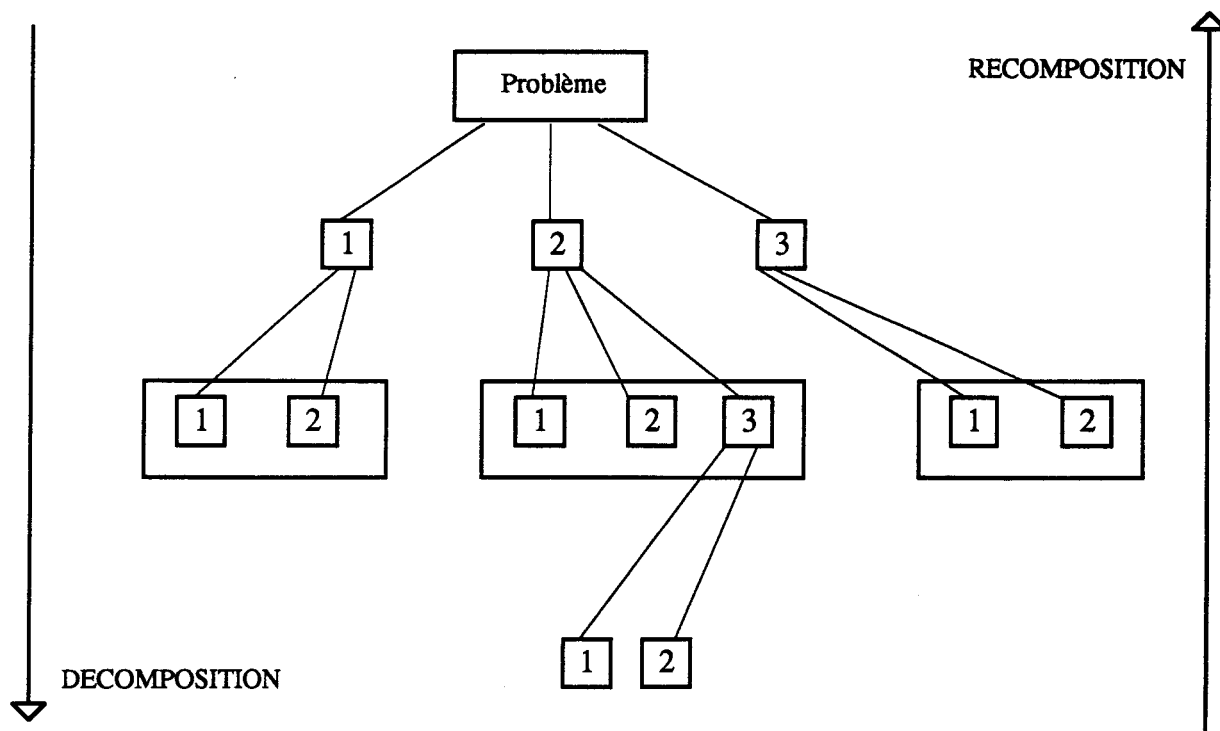
Dans leur optique, concevoir c'est accomplir un ensemble de tâches que la méthode recense et ordonne les unes par rapport aux autres.

La démarche de conception, qu'elles préconisent, peut être résumée ainsi:

pour étudier un phénomène, on le divise en éléments simples, on étudie chacun de ces éléments et on réunit à nouveau ces éléments dans une synthèse.

Ces méthodes cartésiennes sont axées sur la décomposition du processus de conception en phases, elles mêmes décomposées en étapes, organisées éventuellement en sous étapes; au

niveau le plus bas de la décomposition du processus, elles proposent une liste de tâches à accomplir [fig 7].



[fig 7]. Schéma d'une décomposition

Les principales méthodes cartésiennes reprises par ROLLAND [ROLLAND et al, 87] sont: MINOS, ARIANE, PROTEE, AXIAL, ISAC, SADT,...

### 1.3.1.2 SADT: une méthode cartésienne

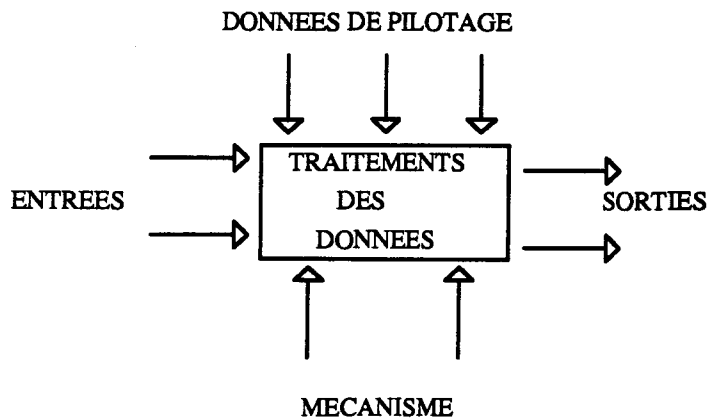
Nous présentons ici celle qui apparaît la plus performante actuellement dans notre champ d'application [DECELLE, 90].

Sous l'influence de la programmation structurée, la méthode SADT a adopté une démarche de décomposition fonctionnelle descendante.

SADT consiste à rédiger différents diagrammes dont chacun représente une activité particulière du projet. Un tel diagramme est dessiné sur des pages séparées et consiste en une représentation de figures rectangulaires et de flèches [fig 8].

Plusieurs rectangles forment un ensemble de diagrammes structurés.

Le descriptif des opérations ou activités traduites par chaque rectangle faisant partie d'un diagramme est soutenu par du texte explicite.



[fig 8]. Le principe de la méthode [DECELLE, 90]

## 1.3.2 Les méthodes systémiques

### 1.3.2.1 Généralités

L'essentiel pour les méthodes systémiques réside dans la compréhension du Système d'Informations (SI) comme système s'insérant dans l'ensemble des autres systèmes de l'organisation; leur préoccupation dominante n'est plus la démarche méthodologique mais elles mettent l'accent sur l'aspect global du SI, sur sa décomposition rigoureuse en éléments et sur la définition des relations entre les éléments.

Elles "voient" le SI moins comme un processus de traitement de l'information, que comme un modèle de la réalité organisationnelle, destiné à apporter la connaissance sur cette réalité aux acteurs de l'organisation.

Le SI est ainsi abordé à travers une approche systémique de l'organisation.

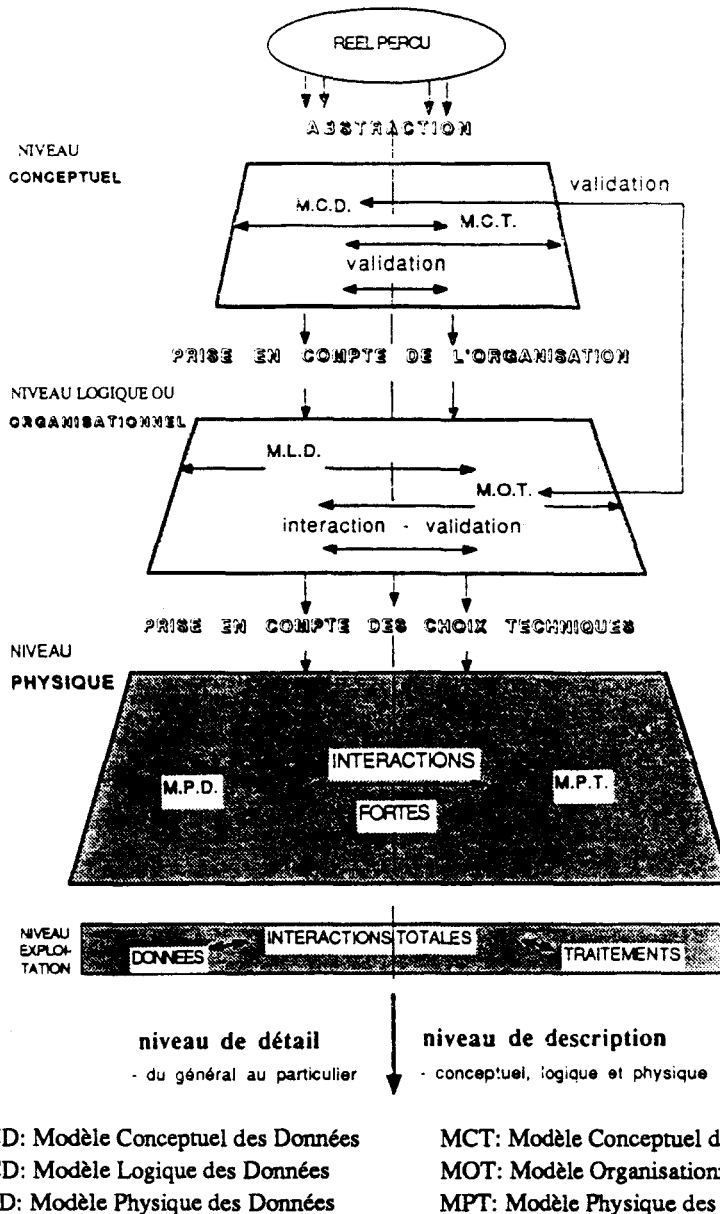
Citons quelques méthodes systémiques: REMORA, IA (appelé aussi NIAM), IDA, MERISE, [REDOUIN, 89], [GABAY, 90],...

### 1.3.2.2 MERISE : une méthode systémique

Nous présentons ici celle qui apparaît la plus performante actuellement dans notre champ d'application [GABAY, 90].

La méthode MERISE est une **méthode de conception** de SI; elle propose une **démarche méthodologique** de développement de système d'informations [fig 9].

Une représentation en MERISE permet de valider des choix par rapport aux objectifs, de quantifier les solutions retenues, de mettre en oeuvre des techniques d'optimisation et enfin de guider jusqu'à l'implémentation [GABAY, 90], [BEZZAZI, 90].



[fig 9]. La méthode Merise [GABAY, 90]

#### 1.4 METHODES DE DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES A BASE DE CONNAISSANCES

De par la nature des problèmes traités, développer un Système à base de connaissances présente des spécificités pour lesquelles les méthodes classiques n'offrent pas de réponses satisfaisantes.

Après des années de conception "structurée", nous assistons à une vague de conception "orientée objet", dont la supériorité tient au fait qu'elle permet de modéliser efficacement le monde réel.

### 1.4.1 Nécessité d'une méthodologie

La conception vient avant la réalisation et nous avons beau affirmer que le concept d'objet permet une conception proche de celle de l'esprit humain, cela se révèle insuffisant dès lors que la taille des systèmes augmente; nous sommes obligés de recourir à une méthode de développement [HART, 88].

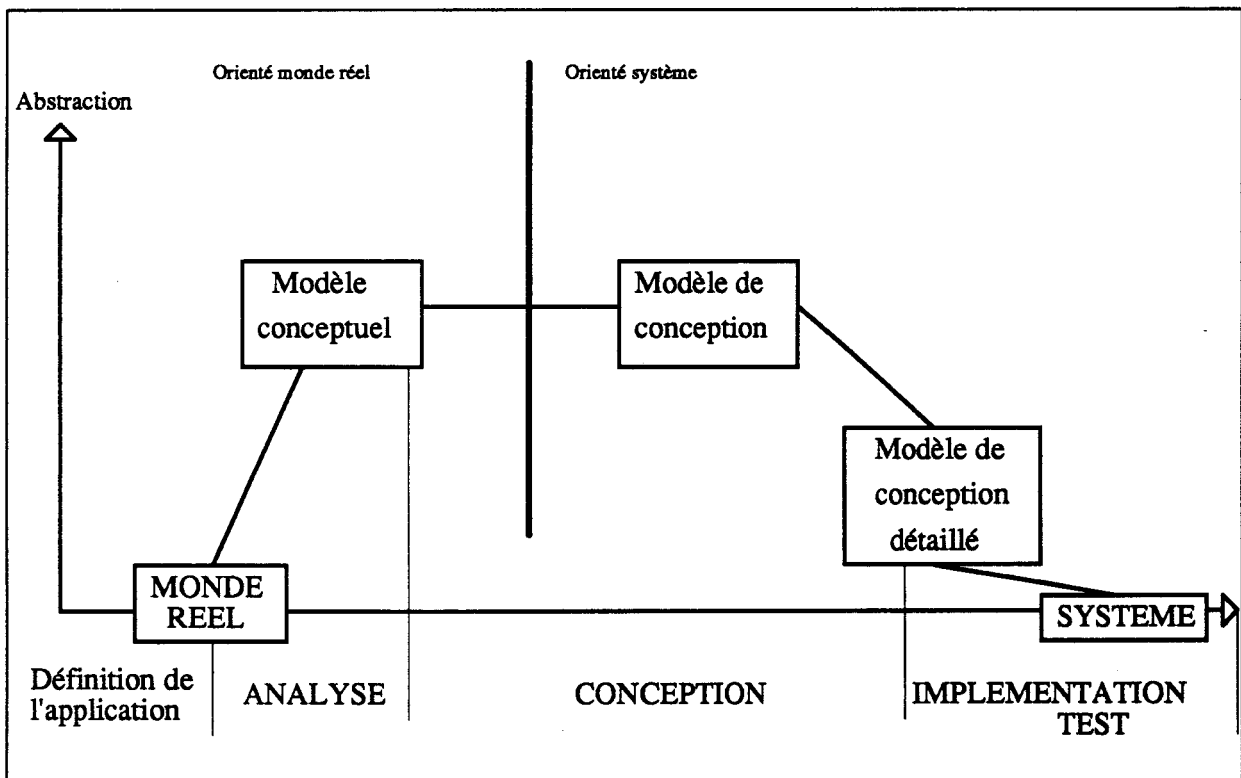
L'apparition des systèmes experts et surtout des langages à objet a donné naissance à une panoplie de méthodes dont les principales sont citées par Castelliani [CASTELLIANI, 91]: La méthode de Grady BOOCH, HOOD (Hierarchical Object Oriented Design), OOA (Object Oriented Analysis), OOSD (Object Oriented Structured Design), YOURDON [AUBERT et al, 90], MEYER [MEYER, 90], KADS [BRUNET et al, 90], MIKE [CEDIAG, 90],...

### 1.4.2 La méthodologie KADS

En matière de méthode de développement, KADS (Knowledge Acquisition and Design Support) est une des réponses les plus avancées; elle est la première méthodologie formalisée d'élaboration de Systèmes à Base de Connaissances [BRUNET et al, 90] et a été élaborée dans le cadre du programme Européen ESPRIT; elle est déjà adoptée par IBM, BULL, ..., et est recommandée par la Communauté Européenne.

Nous rappelons rapidement ici la démarche et les concepts manipulés.

L'approche KADS, que nous utilisons dans notre analyse et qui sert aussi de support à la présentation de notre travail dans ce document, est basée sur une transformation des modèles selon le schéma de la figure 10.



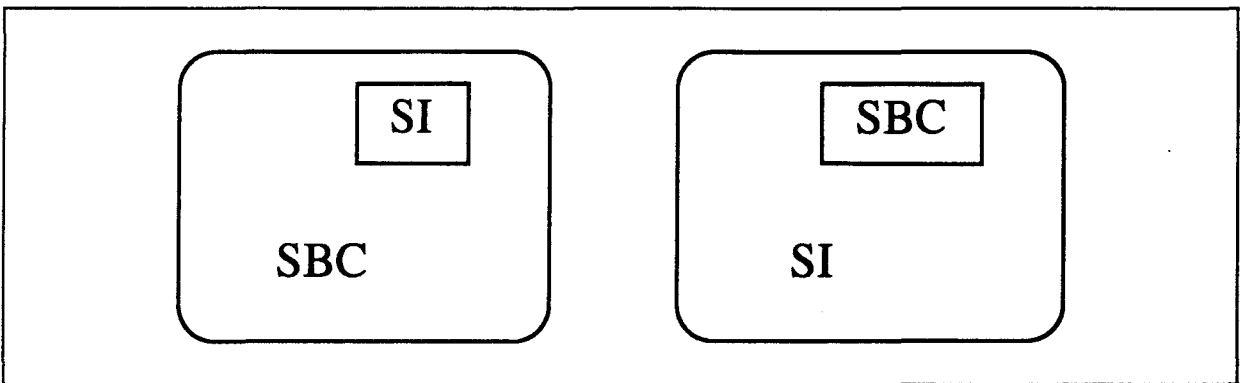
[fig 10]. Méthodologie de développement



## 1.5 DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES D'INFORMATIONS INTEGRES (SII)

Les méthodes classiques se prêtent bien à la modélisation des processus stables et de comportement figé à un moment donné, tandis qu'une méthode de développement de système à base de connaissances prend en compte en complément les dysfonctionnements et l'évolution dynamique des modèles. Sans remettre en cause l'existant, elle permet l'intégration des systèmes à base de connaissances au sein des systèmes d'informations dits classiques et vice-versa [fig 11].

Cette intégration devrait se dérouler de manière naturelle puisque certains problèmes d'interfaçage sont résolus.



[fig 11]. Système d'Informations Intégré

## 1.6 CONCLUSION

La réalisation d'un système à base de connaissances impose d'avoir recours à une méthodologie de développement.

Dans l'objectif d'un choix de méthode, nous avons présenté ici une étude bibliographique des méthodes et de leurs applications concrètes.

L'analyse de ces méthodes dans le contexte de notre application nous a conduit à retenir la méthode KADS (méthodologie d'élaboration de systèmes à base de connaissances) qui est une nouvelle méthode spécifique aux outils de l'IA .

Pour constituer une structuration des informations adaptée à une application Base de données, il apparaît qu'une méthode plus classique comme MERISE, même si elle n'est pas propre à l'IA, est toujours exploitable.

## CHAPITRE 2 : MODELISATION DES OBJETS

### 2.0 PRESENTATION

Ce chapitre définit par une approche globale les objets du monde réel, leur structuration, la façon de les manipuler, leurs relations, ...

Pour spécifier ces objets, on analyse le processus de conception des infrastructures mis en jeu par les ingénieurs afin de recenser les différentes tâches et leur ordonnancement, les procédures utilisées et les données traitées; c'est la phase de **définition du projet** (chapitre 2.1)

Dans une deuxième phase, on définit les entités sur lesquelles on va travailler; c'est la phase de **modélisation du monde réel** (chapitre 2.2).

Dans une troisième phase, on spécifie le système; celui-ci, à partir de données (campagne de sol, définition du projet,...) et d'un certain nombre de contraintes, doit créer progressivement une solution - ou des variantes de solution - qui contienne la définition des différents objets; c'est la phase de **réalisation du modèle conceptuel** (chapitre 2.3)..

### 2.1 DEFINITION DU PROJET

Cette phase comprend la définition de l'objectif du projet et l'analyse du projet.

#### 2.1.1 Définition de l'objectif du projet

Les trois questions fondamentales posées dans cette phase sont:

- quels sont les réels besoins?,
- quels sont les enjeux et les contraintes?,
- qui sont les intervenants?

Nos réponses respectives à ces trois questions sont :

- nécessité d'un noyau commun sur le sol,
- pour notre travail, cette question concerne les différentes contraintes liées aux informations, l'interfaçage avec d'autres outils CAO, la faisabilité du système,...
- Les différents intervenants sont l'ingénieur géotechnicien, le maître d'ouvrage, le maître d'oeuvre, le bureau d'études,...

#### 2.1.2 Analyse du projet

C'est la phase prédominante dans le développement d'un SBC (ou d'un travail de conception); son principe est la construction d'un modèle d'analyse.

Le modèle d'analyse contient un modèle conceptuel, un modèle d'expertise, de coopération et un modèle externe.

Le modèle conceptuel comprend:

- un modèle conceptuel des données et un modèle de traitements décrit aux chapitres 2 et 3 de cette partie II,

- un modèle de coopération et d'expertise développés au quatrième chapitre de cette partie II,

Le modèle externe concerne les spécificités logicielles; il est développé au chapitre 4 de la partie II.

Cette phase d'analyse du projet est fondamentale car le passage aux phases suivantes (modèles de conception et implémentation) ne pourra se faire qu'après que tous les traitements aient été analysés et détaillés.

## **2.2 MODELISATION DU MONDE REEL**

La définition des objets du domaine demande de dresser la liste exhaustive de toutes les informations (éléments ou sources d'informations) et de proposer une modélisation complète, modulaire et représentative du monde réel.

Ces informations représentent la connaissance statique du domaine et peuvent être déclarées en termes d'objet (ou de concept), d'attribut, et de relation entre ces diverses informations.

Par exemple:

- un élément peut être un essai, une couche, une source d'information peut être un résultat de recherche , un cas d'école,...

- la connaissance statique peut être représentée par un essai (objet) auquel on associe des caractéristiques mécaniques (attributs) et mesurées (relation) dans une couche (objet).

Séparer la connaissance statique du domaine, de son utilisation (par exemple les calculs de fondations) est une condition nécessaire pour atteindre une souplesse d'utilisation et faciliter la réutilisation de cette connaissance [DELMAS et al, 90].

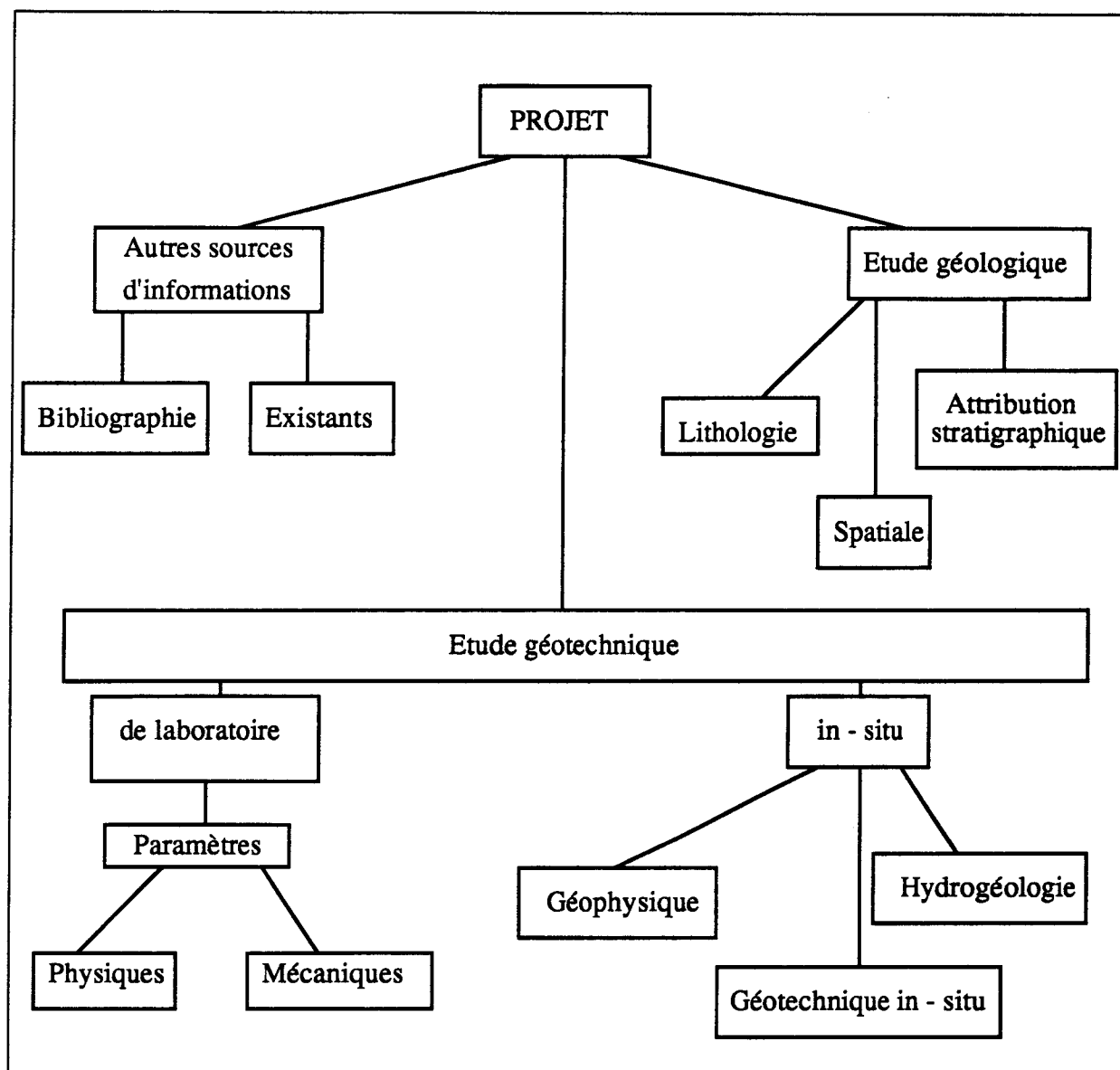
### **2.2.1 Origine des informations**

Nous présentons ici seulement les groupes d'objets que nous avons retenu et les raisons qui nous ont guidé dans ce choix.

Ces objets constituent la partie statique du domaine (concept, relations); l'analyse des informations de la figure 12 montre l'importance des données provenant de la définition du projet, de l'étude géologique et de l'étude géotechnique (essais de laboratoire et in-situ), et de toute autre source d'information.

Dans notre collecte des objets, nous avons recensé toutes les données susceptibles d'être prises en compte dans un projet d'infrastructure indépendamment des applications (fondations, réseaux,...) [COSTET et al, 88], [DTU, 83].

Notre but est de constituer un noyau commun sur le sol et sa mise à disposition aux différents intervenants dans la conception des projets d'infrastructures.



[fig 12]. Les différentes sources des données

A partir de ce graphe, nous allons présenter les informations que véhiculent ces différents groupes.

### 2.2.1.1 Le projet

Le projet nous renseigne sur le nom, la nature de la construction envisagée, les données de la parcelle, la morphologie du site et la topographie. Nous avons regroupé ces informations suivant deux objets (PROJET et PARCELLE). Nous allons décrire ces deux objets et voir les informations qu'ils véhiculent.

#### *Projet*

Le premier objet nous renseigne sur les informations administratives et les différents essais réalisés.

**nom du projet:** ce paramètre permet d'identifier un projet.

**but du projet:** la campagne a été réalisée dans le but de fonder, pour des travaux de terrassement,...

**stade du projet:** nous informe sur la phase ou a été réalisé l'étude.

**date :** deux sortes de date nous intéressent; la date de la réalisation de la campagne et la date du traitement du projet.

**lieu:** deux types d'informations nous intéressent; le premier concerne le lieu du projet et le deuxième concerne le lieu ou le dossier est archivé.

**environ:** le projet est réalisé dans un site urbain, rural,...

**auteur du rapport:** l'entreprise qui a réalisé l'étude.

**maitre d'oeuvre:** le commanditaire de l'étude.

Outre les informations administratives, nous avons des informations sur le nombre d'essais réalisés (en laboratoire et in-situ). et toutes les informations rattachées à l'objet Projet (à savoir tous les autres objets).

### **Parcelle**

**numéro:** numéro de la parcelle.

**coordonnées X et Y:** du contour de la parcelle en mètres.

**cote:** cote terrain naturel de la parcelle rattaché au nivellement général de la France (NGF).

### **2.2.1.2 L'étude géologique**

Les descriptions géologiques sont faites sur une verticale (Sondage), sur une surface (affleurement), ou encore dans un volume (fouille).

Par la mise en oeuvre de moyens divers, on recueille quelques fragments de roches (cuttings), ou une carotte (entière et non remaniée, en tronçon, ou totalement remaniée); on peut aussi avoir une information directe (de visu) sur le terrain.

Les renseignements donnés par l'étude lithologique portent sur la description des différents matériaux et des paramètres susceptibles de modifier leurs propriétés (structure, couleur, fissure,...).

L'étude spatiale permet de connaître la succession et la configuration du terrain; elle nous renseigne sur les différentes cotes NGF, le pendage, les coordonnées géographiques,...

L'attribution stratigraphique, à notre échelle de travail, n'est pas très importante; elle est difficile à réaliser; néanmoins, elle peut être importante pour une grande échelle puisque elle permet de donner un *nom* aux différentes formations rencontrées.

Ces renseignements ainsi acquis portent sur des épaisseurs de terrain elles mêmes très variables allant de quelques dizaines de centimètres à plusieurs centaines de mètres.

Les informations véhiculées par l'étude géologique sont partagées en quatre objets:

le sondage, l'échantillon, la couche et le terrain.

### **Sondage**

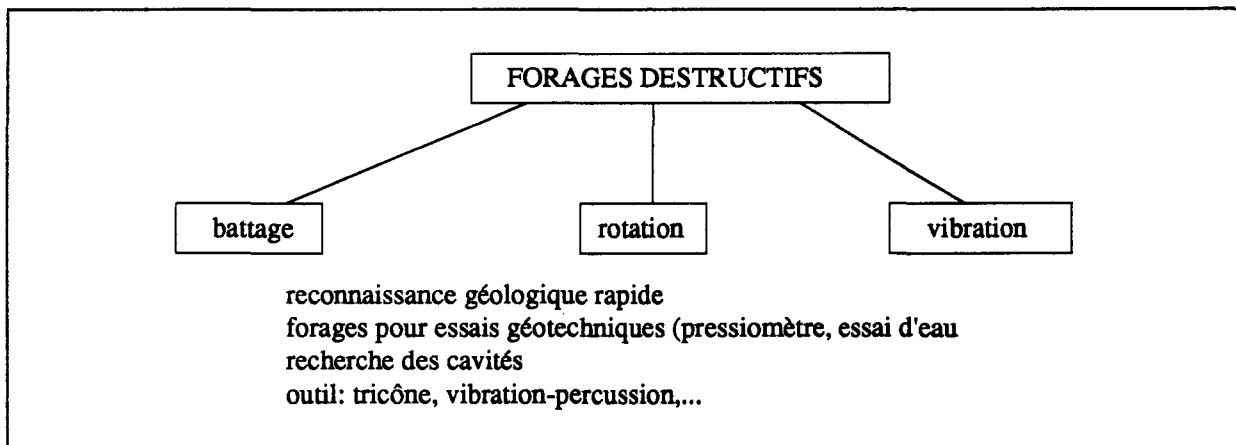
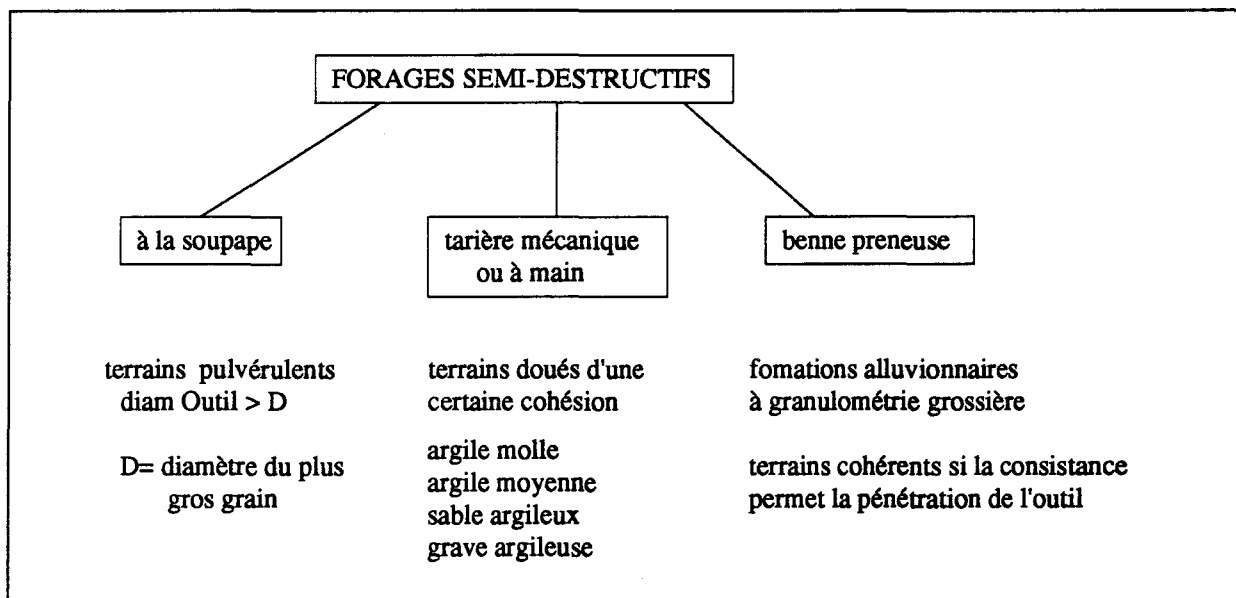
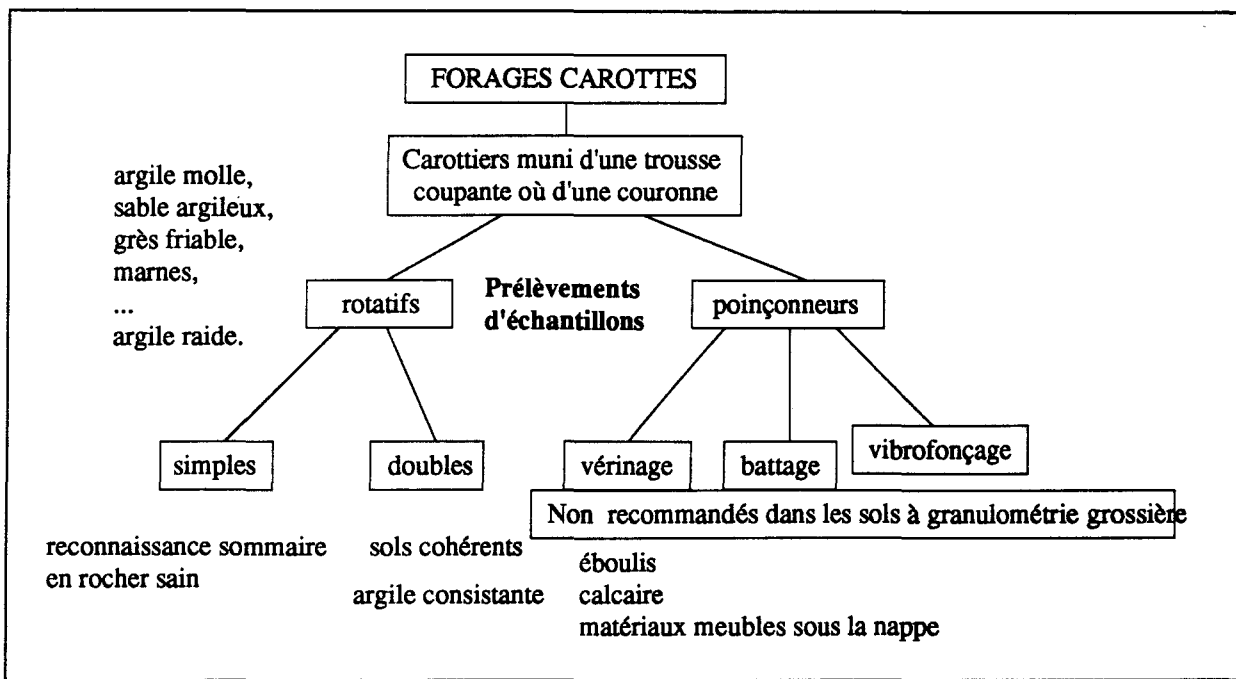
L'élément principale de l'étude est le sondage; il est du point de vue de la formalisation l'élément le plus complexe; il regroupe des informations nécessitant de nombreuses vérifications sur la cohérence; par exemple, un sondage étant réalisé par plusieurs outils, cela engendre un ensemble de vérifications sur la compatibilité entre le type de sondage, l'outil du sondage et les couches.

Nous avons regroupé dans cette objet les informations suivantes:

- date:** date de réalisation du sondage; cette information est associée à tout les objets
- numéro du sondage:** permet d'identifier les différents sondages rattachés à un projet donné et c'est lui qui permet aussi toutes les instanciations des couches et les vérifications sur la cohérence du projet (chapitre 3).
- type de forage:** nous renseigne sur le type de sondage réalisé: tranchée, sondage, fouille,...
- coordonnées X et Y:** nous renseigne sur l'endroit où a été réalisé ce sondage et permet de vérifier son appartenance à la parcelle du projet.
- cotes:** cote du toit supérieur des différentes couches constituant le sondage.
- profondeur:** la profondeur atteinte par le forage.
- couches:** les différentes couches rencontrées.
- nombre:** nombre de couches et d'échantillons prélevés dans ce sondage.
- substratum:** comme il est important de connaître l'épaisseur des différentes couches, et donc de savoir si l'on a atteint le substratum ou non. Nous avons décomposé ce résultat suivant cinq cas de figures (non atteint, très douteux, douteux, probable, sûr).
- type de sondage:** cet attribut nous renseigne sur le type de carottage réalisé (carotté, destructif ou semi-destructif).
- nombre d'outils:** le nombre d'outils utilisés dans ce sondage.
- profondeurs:** les profondeurs cumulées des outils utilisés.
- acceptSond:** comparaison entre les outils et les couches traversées (adapté, interdit, toléré).
- outils:** en fonction des profondeurs, on demande les différents outils utilisés.
- nombre d'échantillons:** prélevés dans le sondage.
- procédé de sondage:** nous renseigne sur les outils utilisés pour le sondage on regroupe dans les tableaux de la page suivante les principaux types de sondage et leurs applications respectives [fig 13].

### ***Echantillon***

Cet objet regroupe les différents échantillons prélevés, leur état (remanié ou non), l'outil utilisé, le mode de prélèvement, le diamètre de l'échantillon, les cotes supérieure et inférieure, le pourcentage de récupération, la qualité de l'échantillon, les paramètres physiques et un numéro associé à chaque échantillon.



[fig 13]. Les principaux types de forages [DTU, 83]

### **Couche**

Cet objet est l'élément central de la modélisation

**nom:** nom de la couche,

**hauteur:** la distance entre le toit supérieur et inférieur de la couche.

**le type de sol:** ce sol est cohérent ou pulvérulent.

**caractéristique du sol:** caractérise le sol (raide, mou, consistant,...).

**couleur:** nous renseigne sur la couleur de l'échantillon du sol.

**classification:** à quelle classification s'apparente le nom donné à cette couche (LCPC, USCS, SETRA,...)

En ce qui concerne le nom des couches de sols, la désignation est déterminée par l'intermédiaire de certains essais de laboratoire (courbe granulométrique, limites,...) et cette désignation peut rentrer dans le cadre d'une classification normalisée; par exemple la classification du LCPC (équivalent français de la classification USCS).

Nous avons recensé des cas de sol connus selon la connaissance plus ou moins précise que nous en avons:

- sa dénomination (argile, sable, graviers,...),

- sa dénomination et quelques paramètres (physiques ou mécaniques),

pour le **sable argileux** l'angle de frottement est compris entre 27 et 33°  
la cohésion est comprise entre 6 et 15 Kpa

- sa dénomination, paramètres physiques et mécaniques.

pour le **sable** l'angle de frottement est compris entre 35 et 40°  
la cohésion est nulle  
le module oedométrique varie entre 50 et 80 daN/cm<sup>2</sup>  
la perméabilité est comprise entre 10<sup>-1</sup> à 10<sup>-3</sup> cm/s

Dans cette perspective, nous avons réalisé une bibliothèque de cas de sol connus dont nous reparlerons dans le chapitre 3 de cette partie.

### **Terrain**

**forme:** nous renseigne sur la forme du terrain (rectangle, carré, quelconque).

**couvert:** couverture végétale,...

**coordonnées:** coordonnées X, Y du terrain.

**nombreParcelle:** nombre de parcelles sur ce terrain.

**surface:** calculée à partir des données des différentes parcelles composants le terrain.

**coupe:** la configuration du sol sous la parcelle.

**topographie:** nous renseigne sur l'état du terrain (accidenté, uniforme,...).

**pendage:** l'angle du pendage (importance de la pente).

**nature:** déduit à partir du pendage et prend une des valeurs suivantes (plat, léger, moyen, beaucoup).



## Les relations entre le sondage, la couche et l'échantillon

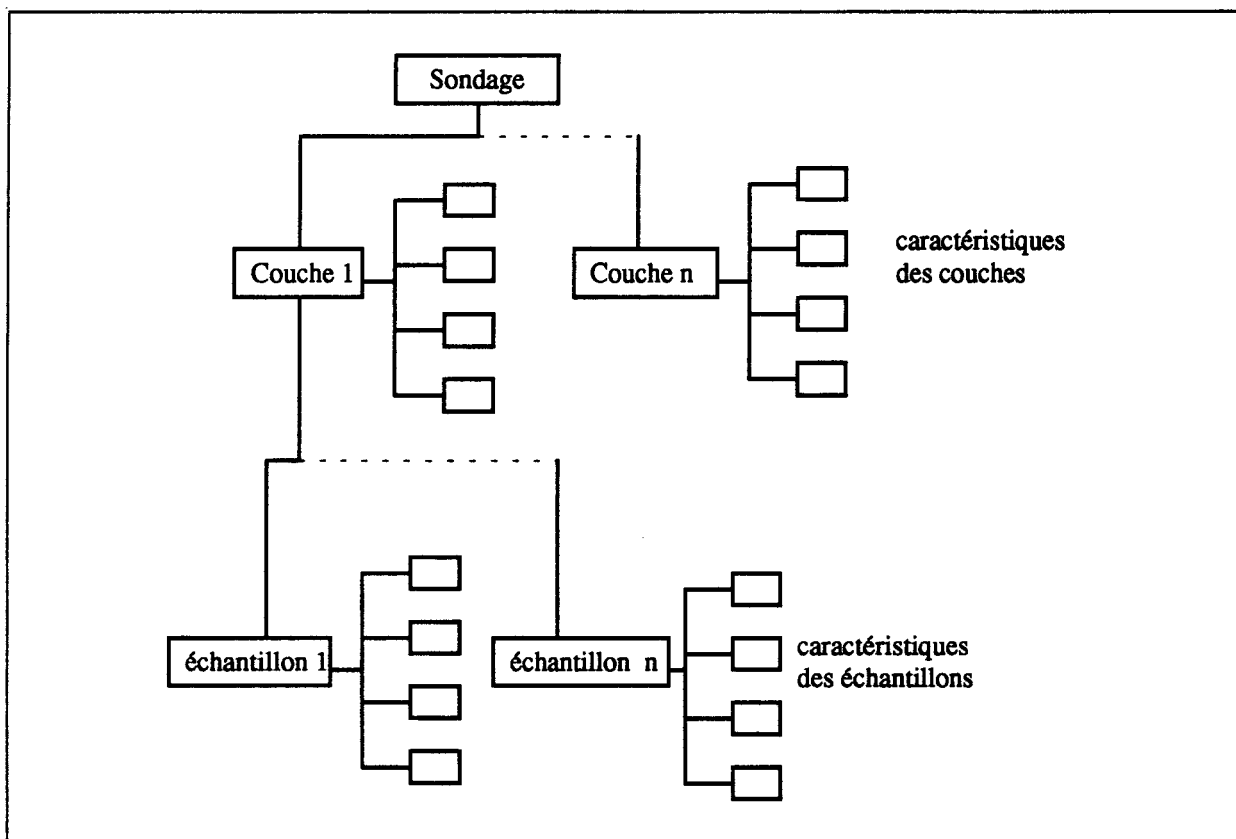
On peut en dépit d'une certaine hétérogénéité apparente, définir une structure des informations délivrées par un sondage. Pour bien mettre en évidence les informations et la structure arborescente préétabli nous distinguons parmi celles ci trois niveaux selon Guiennet repris par Merciera [MERCIERA, 77] [fig 14].

Tout sondage est défini par sa localisation et ses caractéristiques techniques; ces données caractérisent le sondage qui constitue le premier niveau d'information. Ces données ne se répètent pas pour un même sondage.

Par contre un sondage peut contenir plusieurs couches avec leurs propres caractéristiques; nous avons là un deuxième niveau d'information concernant la couche, dont la répétitivité est fréquente.

Chaque couche peut faire l'objet de prélèvements d'échantillons, dont on mesure les caractéristiques géotechniques en laboratoire; on peut définir un troisième niveau pour l'objet échantillon, dont la répétitivité est également fréquente.

Nous verrons au chapitre 1 de la troisième partie sur un exemple concret de la modélisation les relations entre ces trois objets (Sondage, Couche, Echantillon).



[fig 14]. Structure arborescente de l'information géotechnique

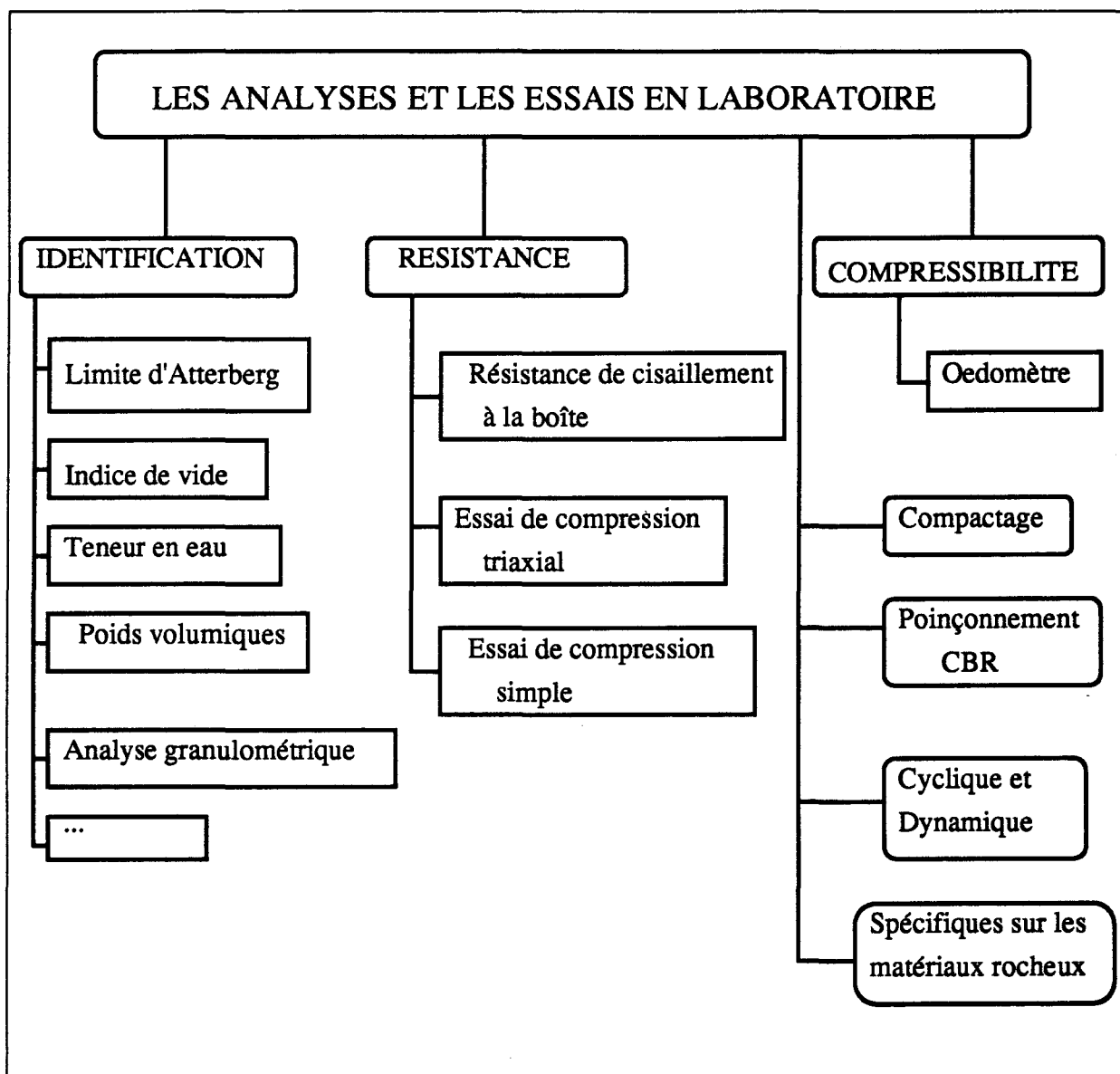
### 2.2.1.3 L'étude géotechnique

Une étude géotechnique complète se déroule généralement en plusieurs étapes, appelées stades de reconnaissances, échelonnées dans le temps et répondant à un objectif précis.

A partir du graphe de la [fig 12] décrivant les différentes sources d'informations, nous allons mettre en valeur tous les objets du domaine: essais de laboratoire et essais in-situ.

#### *Les essais de laboratoire*

A partir des éprouvettes, on réalise au laboratoire une série d'essais ayant pour but de déterminer deux grandes familles de paramètres: les paramètres physiques et mécaniques [fig 15].



[fig 15]. Les essais géotechniques de laboratoire

L'étude géotechnique de laboratoire nous donne à partir des éprouvettes de matériaux, prélevées dans les carottes de sondage ou directement sur le terrain, des résultats de paramètres physiques : teneur en eau, porosité, indice de vides,... et mécaniques : cohésion, coefficient de compressibilité, module oedométrique,...

Tous les essais de laboratoire qui déterminent des caractéristiques mécaniques représentent une classe; à titre d'exemple, nous allons voir toutes les informations véhiculées par l'essai oedométrique [fig 16] formalisées par l'objet Oedomètre.

numOedo:	On attribue un numéro à l'essai oedométrique
typeEssai :	type d'essai: (paliers, fluage,...)
typeOedo:	type de boîte oedométrique (Terzaghi, Charge-pneumatique,...).
diametre:	diamètre de l'échantillon
hauteur de l'éprouvette:	hauteur de la boîte
hauteur de l'éprouvette:	hauteur de la boîte corrigée
positionEchantNappe:	[sous-nappe, hors-nappe, zone-battement]
contrainteTerre:	contrainte effective en place
contraintEffect:	contraintes effectives (chargement)
indiceInitiale:	$e$
indiceVide0:	$e_0$
indiceVide:	valeurs des $e_i$
indiceMoyen:	valeur moyenne des $e_i$
tassementEpr:	tassement de l'éprouvette au 1/100 mm
preconsolid:	pression de préconsolidation
moduleOedo:	$E_{oed}$
coefCompress:	$m_v$
indiceCompress:	$c_c$
indiceDecompress:	$c_g$
acceptEss :	acceptabilité de l'essai par rapport à la couche et le sondage (adapté, toléré, interdit)
confEss : 100	confiance accordée aux résultats de l'essai en %
etatConsol:	type : [normalement-consolidé, anomalie]
etatCompress:	type : [incompressible, très-peu, peu, moyennement,...]
paliers:	paliers considérés pour la détermination des valeurs ci-dessous
coeffConsolid:	$c_v$
degreConsolid:	50 ou 90
permeabilite:	$K_v$

[fig 16]. Objet Oedomètre

Les paramètres physiques sont eux représentés par un seul objet appelé physique; la liste de ces paramètres est la suivante [fig 17]:

• -- profEssai : ()	----->	Profondeur à laquelle a été réalisée l'essai
-- PvSature : ()		
-- PvHumide : ()		
-- PVgrains : ()		
-- PvSec : ()		
-- PvEau : 10		
-- PvDdejauge : ()		
-- teneurEau : ()		
-- teneurEauSat : ()		
-- indiceVide : ()		
-- degreSatur : ()		
-- porosite : ()		
-- compacite : ()		
-- densiteR : ()		
-- eMax : ()		
-- eMin : ()		
-- ES : ()		
-- etatES : ()	----->	[argile-pure,sol-plastique,sol-non-plastique,sable-pur-et-propre]
-- diamPgG : ()		
-- tamis80 : ()		
-- refus2 : ()		
-- granulometrie : ()	----->	Type classe
-- coeffUniformite : ()		
-- coeffCourbure : ()		
-- Granularite : ()		
-- teneurCaCO3 : ()		
-- dosageMO : ()		
-- limiteL : ()		
-- limiteP : ()		
-- limiteS : ()		
-- indiceL : ()		
-- indiceP : ()		
-- gonflPotentiel : ()	----->	[faible,moyen,eleve,tes-eleve]
-- degrePlast : ()	----->	[non-plastique,peu-plastique,plastique,tes-plastique]
-- caracDomine : ()	----->	nous renseigne sur le caractère dominant à partir de Ip
-- etatConsol : ()		
-- etatCompress : ()		
-- indiceC : ()		
-- etatC : ()	----->	[liquide,tes-mou,mou,mi-consistant,tes-consistant]
-- proctor : ()	----->	Type classe
-- cbr : ()	----->	Type classe
-- permeabilite : ()	----->	Type classe

[fig 17]. Objet Physique

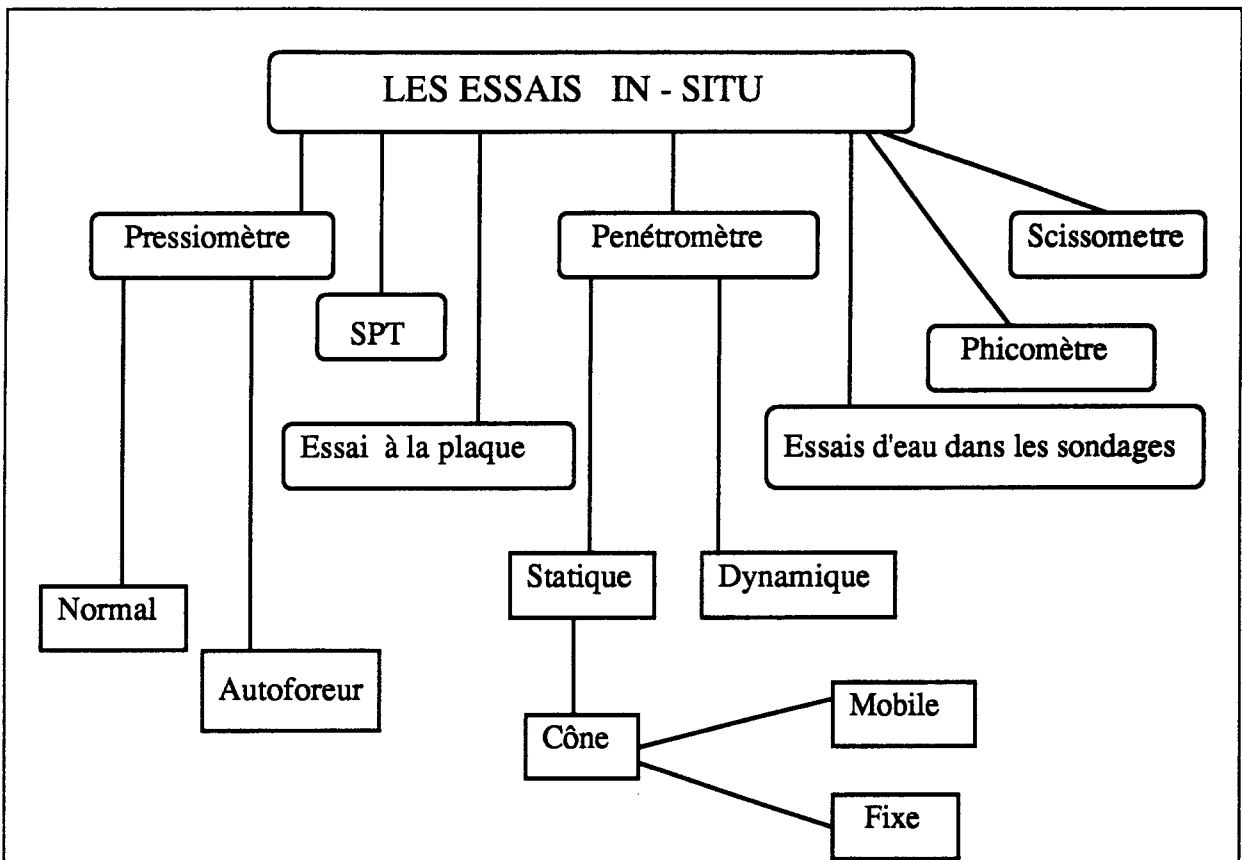
### Les essais in-situ

L'étude in-situ géophysique nous donne des informations sur la présence d'anciennes galeries, cavités,...

Les essais géotechniques in-situ permettent d'évaluer les paramètres de résistance au cisaillement, les paramètres de compressibilité, le module pressiométrique, la résistance dynamique,... [fig 18]

L'étude hydrogéologique nous informe sur les mesures de niveaux piézométriques, l'essai de perméabilité, en vue de connaître la présence et le niveau de la nappe phréatique.

Pour des raisons d'exhaustivité, nous avons listé exhaustivement les essais bien que nous n'ayons pas défini tous les traitements associés.



[fig 18]. Les essais géotechniques in-situ

A partir de cette figure, nous avons mis en place huit objets véhiculant toutes les informations sur les essais; ces objets sont:

- pressiomètre,
- pressiomètre autoforeur,
- pénétrömètre statique,
- pénétrömètre dynamique,
- standard penetration test (spt),
- phicomètre,
- scissomètre de chantier,
- les essais d'eau regroupés sous la dénomination "Nappe".

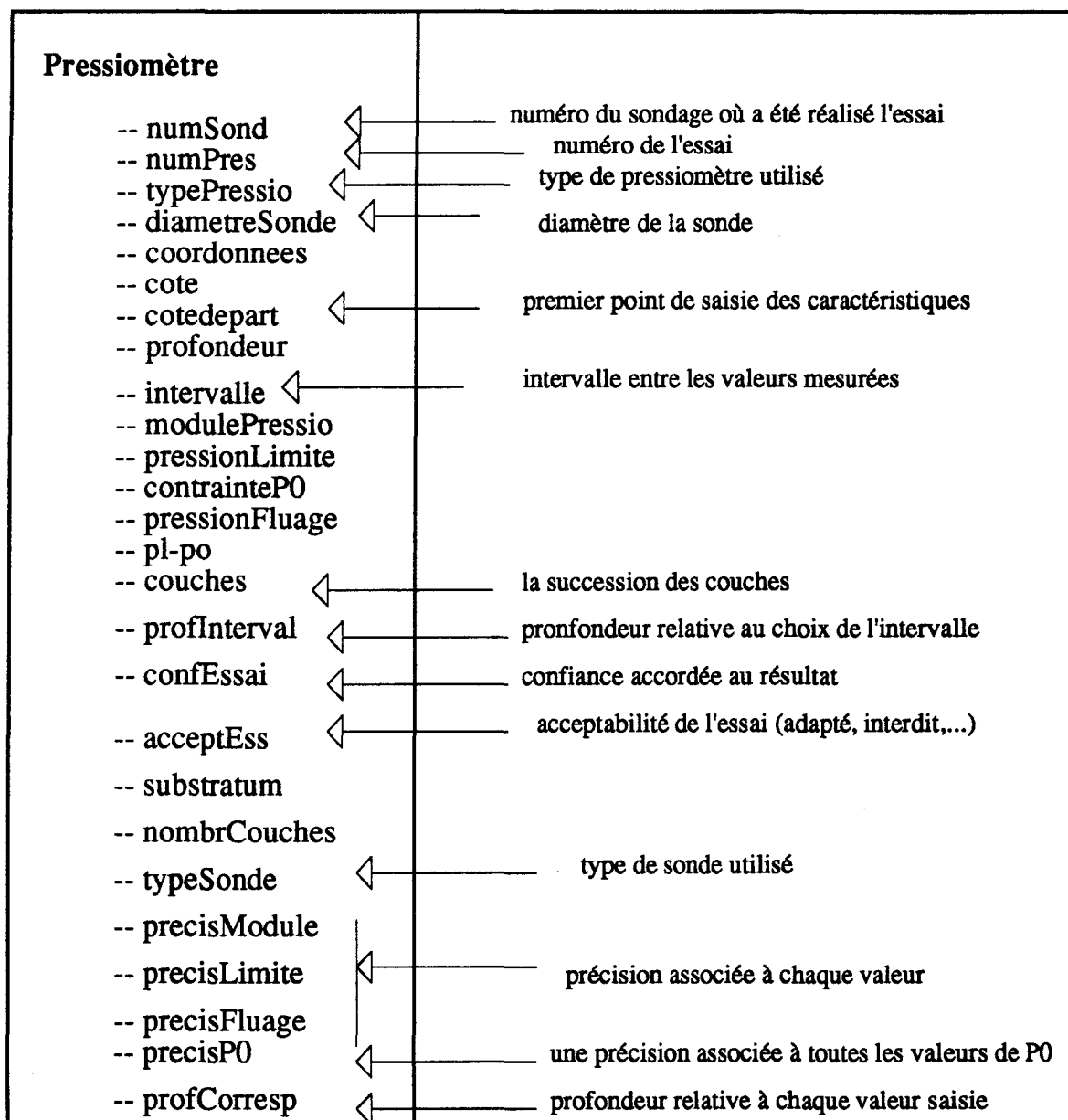
Les informations communes pour l'ensemble de ces objets sont:

les coordonnées, la cote, le numéro de sondage.

Nous n'allons pas détailler tous les objets mais nous prenons deux objets pour montrer les informations véhiculées; le premier sera l'objet 'Pressiomètre' et le deuxième l'objet 'Nappe'.

En plus des informations communes et du type de matériels utilisés, chaque objet comporte des caractéristiques mécaniques associées aux différentes couches traversées [fig 19].

### *Pressiomètre*



[fig 19]. L'objet Pressiomètre

Dans les autres essais on retrouve bien ces trois groupes d'informations (coordonnées, matériel et caractéristiques).

**Nappe**

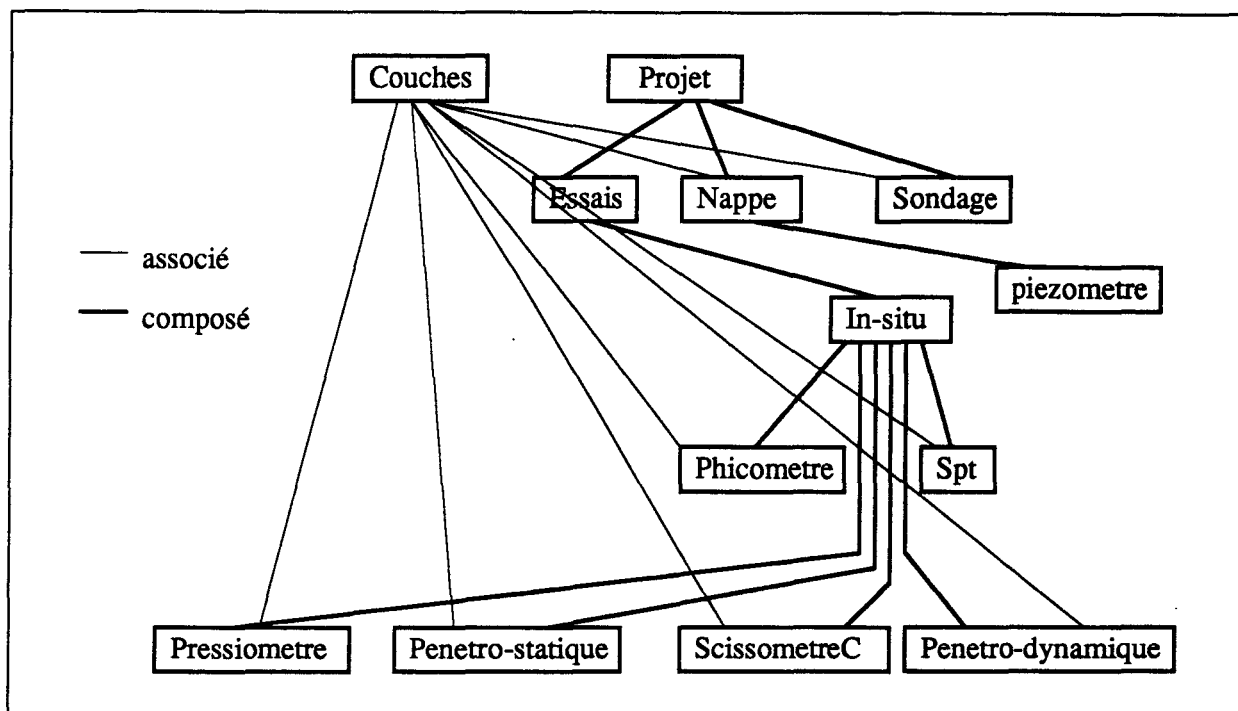
Cet objet regroupe les informations sur la présence de la nappe, sa variation, son type, les essais d'eau in-situ et les piézomètres mis en place dans les sondages.

<b>Nappe</b>	
nombrPiezo	nombre de piézomètre
piezometre	contient les dates et les niveaux
TypeEssai	Type [Lefranc, Lugeon,... Autre]
date de mesure	date de mesure de la perméabilité
profondeurs	profondeurs de mesure
coordonnées	coordonnées des points de mesure
cote	cotes des points de mesure
perméabilité	valeurs respectives de la perméabilité
type de nappe	libre, semi-libre, captive, semi-captive
variation	nous informe sur la variation de la nappe [peu, variable,...]
niveau statique	niveau statique de la nappe

[fig 20]. L'objet Nappe

**Les relations entre les objets essais in-situ et l'objet couche**

Pour des raisons pratiques nous avons regroupé les essais in-situ suivant la figure [fig 20]; par contre la nappe est définie comme un objet à part par rapport aux différents objets regroupant les essais in situ.



[fig 21]. Relations entre les objets issus des essais in-situ et l'objet couche

#### 2.2.1.4 Les autres sources d'informations

Les autres sources d'informations sont multiples; elles peuvent provenir d'une étude bibliographique sur le sol, d'essais et de couches bien connus, d'existants en matière de construction (construction avoisinante),...

Ces différentes informations pré-existantes sont regroupées dans l'objet 'Analyse' et présentées sur la figure 22:

Analyse	
-- constr_voisines	← constructions à proximité
-- distance	← distance séparant la construction du terrain
-- hauteur	← hauteur des constructions voisines
-- type_fondation	← superficielles, semi-profondes, profondes
-- profondeur_ancrage	
-- ancien_constr	← constructions existantes sur la parcelle
-- type_fond	
-- profond	
-- anomalie	

[fig 22]. L'objet Analyse



**Remarque:**

Nous ne revenons pas ici sur les sources d'incertitudes lors des essais de reconnaissance; notre souci est d'associer aux caractéristiques du sol mesurées ou déduites un attribut de précision permettant d'associer à chaque information fournie son degré de vraisemblance.

Cet attribut sera exploité partiellement par les traitements; on verra un exemple de traitement et les conditions d'attribution de cette confiance.

Ainsi les paramètres d'un essai de cisaillement seront:

paramètre	angle de frottement	cohésion
précision %	precisAngle	precisCohésion
Essai	confiance Essai	

Ainsi tous les attributs d'objets auront un attribut de précision lié à chaque paramètre et un attribut de précision lié à l'essai.

## 2.3 REALISATION DU MODELE CONCEPTUEL

Nous avons analysé et présenté tous les objets (et leurs attributs) qui définissent l'application. En effet, pour mettre en place le modèle conceptuel, la méthodologie exige de regrouper les entités du domaine sous forme d'objets et de généralisation d'objets, décrits par des attributs, des relations structurelles, fonctionnelles ou autres.

Dans notre application, ces objets représentent les éléments de la reconnaissance de sol ainsi que la définition du projet; les traitements qu'on doit leur appliquer pour les rendre cohérents seront décrits dans le troisième chapitre.

Nous avons constaté que les données liées à un projet d'infrastructure sont de quatre types:

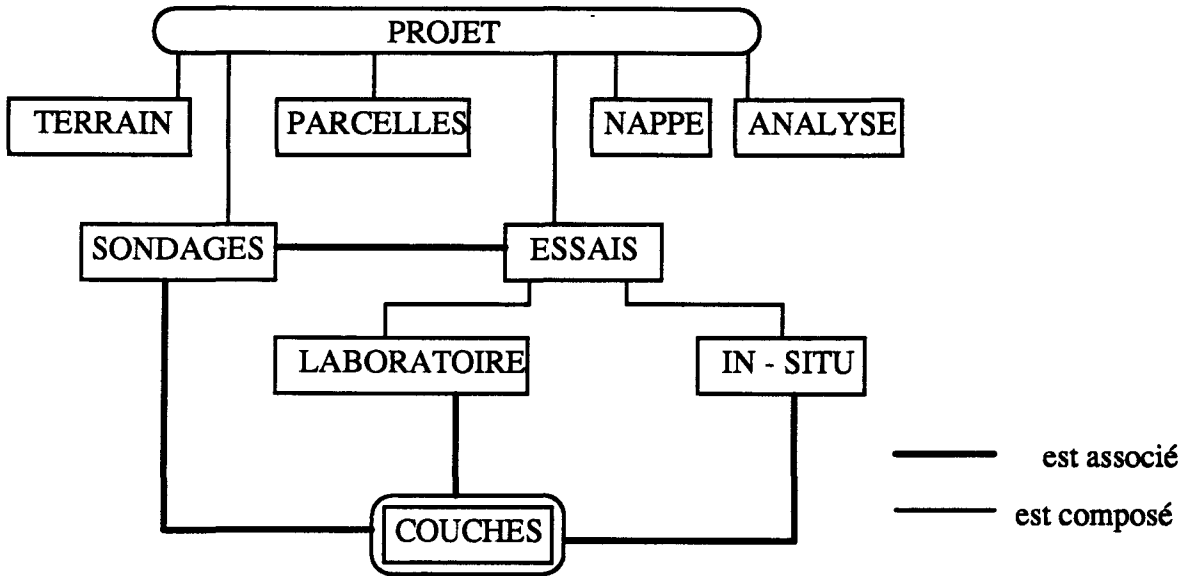
- Administratif : nom du projet,....,
- géométrique : géométrie des couches,....,
- mécanique : caractéristiques quantitatives,
- identification : caractéristiques qualitatives.

Nous avons analysé et décrit les données regroupées sur la figure 12; et avons choisi de conserver la même organisation pour les objets de notre modèle conceptuel.

### 2.3.1 Les objets du modèle conceptuel

Ces objets et leur relations constituent la partie statique du domaine (concepts, relations et structures) [fig 23]; cette analyse montre l'importance des données provenant de la définition du projet, de la campagne de reconnaissance géologique, et des essais géotechniques.

Nous avons présenté préalablement tous les objets, nous allons recomposer ces différents objets pour montrer l'avantage de cette modélisation à travers la notion d'héritage et d'exhaustivité des attributs.



[fig 23]. Les différentes relations

### 2.3.2 Choix d'une stratégie de modélisation

Même si cette opinion n'est pas partagée par tous, nous pensons qu'il est nécessaire de faire une sélection parmi les données pour un ou plusieurs objectifs donnés [THOMAS, 75], [MERCIERA, 77]; en effet, certaines données ne seraient jamais sollicitées et ne feraient qu'alourdir les traitements; par exemple, l'attribution stratigraphique utile à grande échelle n'est pas utile à nos traitements actuels.

Cependant, l'excès inverse qui consiste à ne collecter que les données nécessaires pour une application déterminée n'est pas non plus satisfaisant; en effet, il est impossible à un moment donné de dresser la liste de tous les traitements que pourraient dans le futur demander les utilisateurs; un même problème peut être repris sous un angle différent en introduisant et en faisant varier de nouveaux paramètres; par exemple, la nouvelle classification des RTR [SETRA-LCPC, 92] introduit l'essai au bleu pour classer les sols; cet essai n'était pas pris en compte dans l'ancienne classification.

En pratique, la stratégie que nous utilisons a une double préoccupation:

- La première est de raisonner en terme d'objets en ayant soin de noter toutes leurs caractéristiques essentielles et en formalisant au besoin leur description; par exemple, l'essai au bleu est défini comme un objet et bientôt un traitement lui sera associé; par contre l'attribution stratigraphique qui a été aussi définie de manière formelle n'a pas pour l'instant de traitement en vue, donc de possibilité d'instanciation.
- La seconde préoccupation est indépendante des objets et concerne le type d'implémentation à réaliser; il s'agit de trouver une structure assez souple pour que l'introduction ultérieure de nouvelles entités ne la remette pas en cause; la validation de nouveaux essais ne demanderait que l'adjonction de nouveaux objets et traitements associés sans remise en question de la structure initiale.

### 2.3.3 Limites du modèle conceptuel des objets

L'une des limites du modèle est la non exhaustivité des objets concernant le domaine du sol: nous n'avons pas modélisé les objets concernant les essais géophysiques.

Une autre limite concerne la non introduction d'essais bruts. Notre objectif initial était d'introduire chaque essai par ses données brutes et de dépouiller ces données.

Nous nous sommes limités partiellement à l'acquisition des résultats d'essais.

## 2.4 CONCLUSION

La modélisation proposée présente divers avantages:

- elle est une représentation naturelle des connaissances du domaine du génie civil,
  - elle est une organisation modulaire des objets; la connaissance ainsi modélisée est structurée et décentralisée; les objets peuvent fonctionner indépendamment les uns des autres,
  - elle permet aux différents objets d'être accessibles en consultation par le concepteur lui-même et en utilisation pour les traitements; le concepteur peut donc compléter les informations ou interroger convivialement le système.
-

## CHAPITRE 3 : LES TRAITEMENTS

### 3.0 PRESENTATION

Nous avons tout d'abord étudié au deuxième chapitre dans le détail la nature et la signification des paramètres utilisés en mécanique des sols, observé leurs liens d'interdépendance.

Nous présentons dans ce chapitre les traitements liés aux paramètres de sol, en mettant l'accent sur les différentes vérifications allant de l'ordre de grandeur des paramètres au contrôle de la qualité d'une donnée déduite (analyse de cohérence) [3.2]

### 3.1 MODELE DES TRAITEMENTS

La détermination du modèle d'expertise dans la méthodologie KADS, consiste dans un premier temps à définir les traitements qui sont à réaliser et leur finalité.

Pour construire ce modèle des traitements, on doit répondre à deux questions:

**Question 1:** A partir des objets définis dans le modèle conceptuel des données, quels sont les traitements à réaliser ?

**Question 2:** Quelle structure (règle, méthode,...) adopter pour mettre en place ces traitements?

La réponse à la première question correspond à deux préoccupations: analyse de la cohérence des informations et mise à la disposition des applications exploitant la base de connaissances de ces informations.

Ces deux traitements peuvent s'enchaîner de la manière suivante:

- 1- si la cohérence des informations introduites est mis en doute, demander l'intervention de l'utilisateur,
- 2- Une fois les informations jugées cohérentes par le système, activer les traitements pour la détermination des caractéristiques nécessaires à une application (fondations, terrassement,...).

La réponse à la deuxième question dépend de la plate-forme informatique choisie; elle sera détaillée dans le chapitre 4 de cette deuxième partie.

### 3.2 L'ANALYSE DE COHERENCE

Le recensement de tous les paramètres de sol nous a permis d'analyser les paramètres physiques et mécaniques ainsi que leurs liens; nous avons aussi estimé l'ordre de grandeur des paramètres et étudié les différentes relations entre eux, ceci dans le but de répondre au souci de la cohérence des informations sur le sol.

Nous présentons cette analyse sous forme d'une liste des traitements concernant toutes les données du projet:

- les traitements sur l'ordre de grandeur des caractéristiques [3.2.1],
- les traitements sur la compatibilité entre l'essai et/ou le sondage et les couches rencontrées [3.2.2],

- les traitements sur l'ordre de grandeur des caractéristiques par rapport à la nature des couches [3.2.3],
- les traitements concernant les vérifications sur les données géométriques [3.2.4],
- les traitements concernant la corrélation entre des caractéristiques géotechniques [3.2.5],
- les traitements concernant la vérification des caractéristiques d'un même essai [3.2.6],
- les traitements concernant la vérification sur les objets et sur leurs attributs [3.2.7],
- les traitements diminuant les incertitudes [3.2.8],
- les traitements concernant la vérification sur des essais identiques sur une même couche [3.2.9],
- les traitements de contrôle de validité d'une valeur déduite [3.2.10].

Nous allons détailler ces traitements un à un.

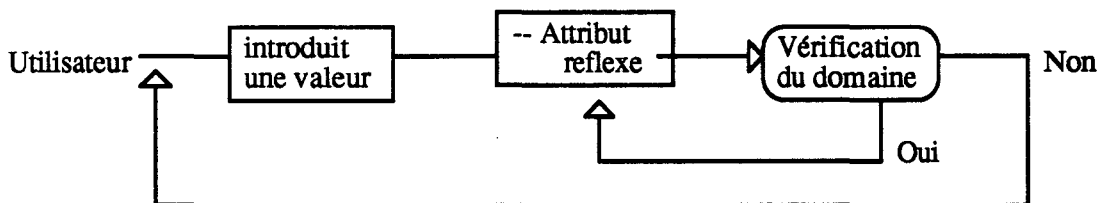
### 3.2.1 Traitements sur l'ordre de grandeur intrinsèque des caractéristiques

Cet ordre de grandeur donne un intervalle à priori sur un paramètre; nous avons recensé les domaines de variation de tous les paramètres de sol; nous présentons ci-dessous quelques paramètres avec leur ordre de grandeur [fig 24]:

-le poids volumique du sol humide :	$15 < \gamma_h < 22 \text{ KN/m}^3$ ,
-le poids volumique des grains :	$24 < \gamma_s < 28 \text{ KN/m}^3$ ,
-le poids volumique du sol sec :	$2 < \gamma_d < 20 \text{ KN/m}^3$ ,
-la teneur en eau :	$0 < w < 300 \%$ ,
-l'équivalent de sable :	$0 < ES < 100 \%$ ,
-la teneur en carbonate de calcium :	$0 < \text{CaCO}_3 < 100 \%$ ,
-la limite de liquidité :	$0 < w_L < 400 \%$
-la limite de plasticité :	$0 < w_p < 150\%$ ,
-indice de compression :	$0 < C_c < 4 \text{ (sd)}$ ,
-le coefficient de consolidation :	$10^{-3} < C_v < \infty \text{ (m}^2/\text{s)}$ ,
-la cohésion :	$0 < c < 1000 \text{ KPa}$ ,
-la valeur N du Standard Penetration Test :	$0 < N < 100$ ,
-la résistance $q_c$ du pénétromètre statique:	$0 < q_c < 40000 \text{ KPa}$ ,
-la résistance $q_d$ du pénétromètre dynamique:	$0 < q_d < 40000 \text{ KPa}$ ,
-l'angle de frottement :	$0 < \phi < 45^\circ$ .

[fig 24]. Ordre de grandeur de quelques paramètres

La procédure consiste à déclencher un message d'erreur montrant le domaine de variation du paramètre saisi et demande à l'utilisateur l'introduction d'une nouvelle valeur [fig 25]. Nous verrons au paragraphe 3.2.3 comment s'affine ce domaine en fonction de la saisie des couches de sol.



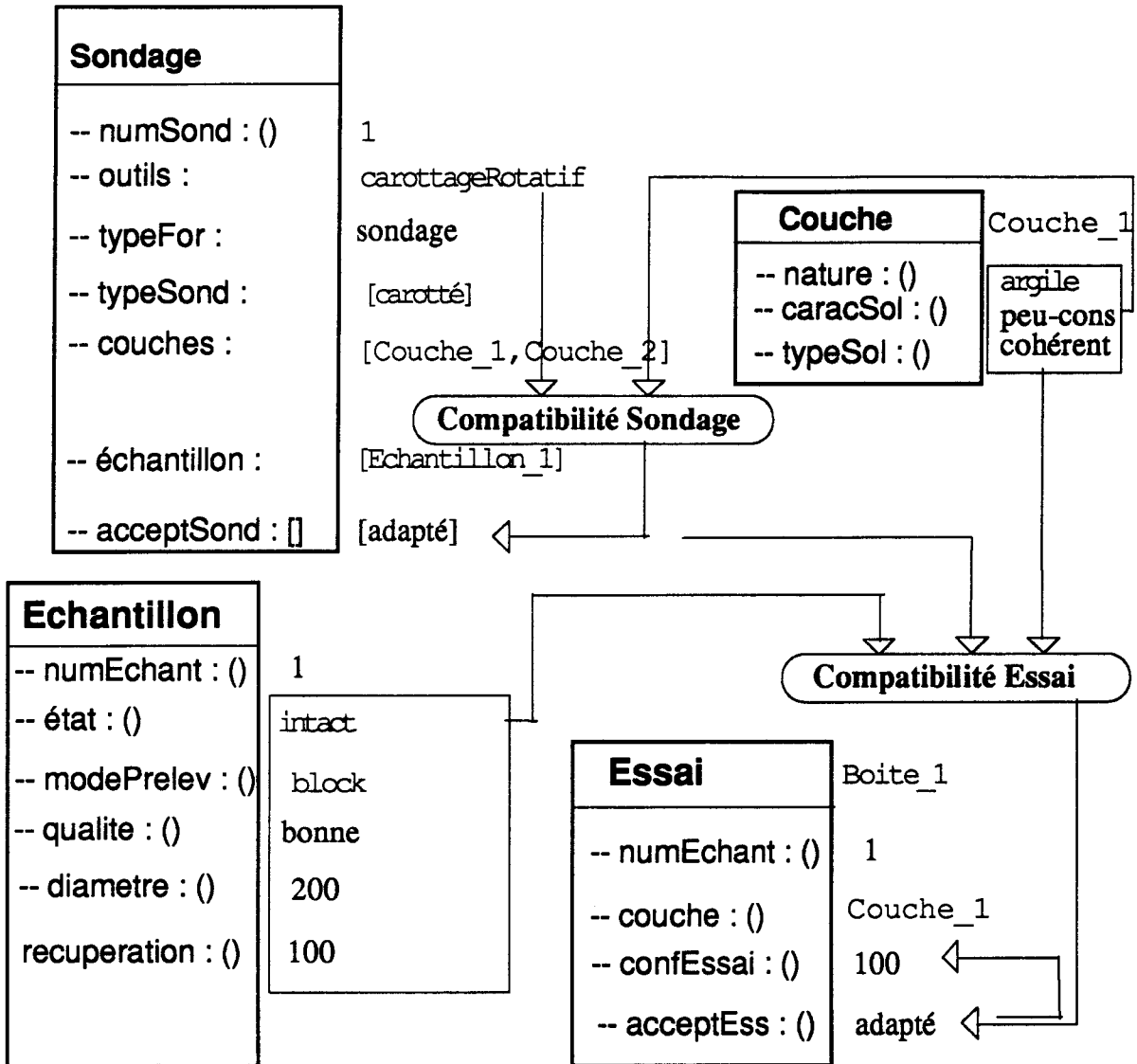
[fig 25]. Vérification intrinsèque type de représentation inspiré de [ZE, 92]

### 3.2.2 Traitements sur la compatibilité entre l'essai et/ou le sondage et les couches rencontrées

Ce traitement consiste à vérifier si l'essai et/ou le sondage réalisé était adapté, toléré, interdit avec les couches rencontrées; ce traitement associe un degré de confiance à l'essai.

Pour ces traitements nous avons utilisé des règles de production.

la figure 26 illustre la relation entre les objets "sondage", "couche" et "essai" et montre comment certains attributs sont déduits et comment est vérifiée la compatibilité.



[fig 26]. Compatibilité entre les essais, les couches et les sondages

Supposons qu'un essai à la boîte de cisaillement ait été réalisé dans une couche de sol de nature précise (ici argile). Ce traitement vérifie alors la compatibilité sondage et la compatibilité essai:

**la compatibilité Sondage** est vérifié entre le type de sondage pris parmi [carotté, destructif ou semi-destructif] (ici carotté) déduit du type d'outil utilisé pris parmi [tarière à main, carottage rotatif, marteau perforateur,...] (ici carottage-rotatif) et la nature de la couche (ici argile peu consistante); le système déduit l'acceptabilité du sondage prise parmi [Adapté, toléré, interdit].

**la compatibilité Essai** est vérifiée en fonction de la qualité, du diamètre, du mode de prélèvement et de l'état de l'échantillon pris parmi [intact, remanié, compacté] (ici intact), de la nature de la couche et l'acceptabilité du sondage; l'acceptation de l'essai ou son refus parmi [adapté, toléré, interdit] (ici adapté) est déduite par le système.

Le traitement attribue une valeur à l'attribut confiance de l'essai ici 100% de confiance à l'essai à la boîte de cisaillement; ce paramètre est différent de la confiance à attribuer aux valeurs des paramètres déduites de cet essai.

Nous avons recensé dans la bibliographie [BOISSIER, 82], [DTU, 83], [VERDEYEN et al, 68], [CASSAN, 88], [COSTET et al, 88],... des informations qui nous ont permis de mettre en place ces vérifications.

La figure 27 présente une liste non exhaustive et non ordonnée des règles qui nous permettent de vérifier cette compatibilité; certaines d'entre elles proviennent des modèles présentés à la figure 13 du chapitre 2.

Si Forage carotté	Alors Rotatif ou Poinçonneur
Si Forage carotté (FC)	Alors Echantillon (prelevement)
Si FC Rotatif	Alors Sol fin ou Roche
Si FC Rotatif	Alors Simple ou Double
Si FC Simple	Alors Roche saine
Si FC Double	Alors Sol cohérent ou Roche dure ou Argile consistante
Si tarière lourde	Alors essais d'identification, CBR et Proctor
Si FC Poinçonneur	Alors Vérinage ou Battage ou Vibrofonçage
Si Verinage	Alors Non Recommandé dans les sols à granulométrie grossière
Si Battage	Alors Non Recommandé dans les sols à granulométrie grossière
Si outil non adapté	Alors échantillon remanié
Si tricône	Alors sans remontée d'échantillons,
Si battage ou vérinage	Alors adapté pour les sols meubles sous la nappe
Si argile molle et sol organique et si profondeur >12 m	Alors échantillon est remanié
Si Vibrofonçage	Alors Utilisé pour les sols à granulométrie grossière
Si tarière	Alors essais d'identification
Si FC dans sable	Alors information qualitative
Si tarière	Alors essai CBR
Si tarière mécanique lourde	Alors adapté pour le sondage préssiomètre
Si marteau perforateur	Alors imprécision de la coupe géotechnique
Si pénétrométriques	Alors applicables à tout type de sol,
Si carottier Mazier	Alors terrain dont la résistance à la compression est < 5 Mpa
Si marteau-perforateur	Alors adapté aux roches dures
Si tarière	Alors interdit sous nappe
Si diamètre carottier est grand	Alors échantillon est très bon
Si scissomètre	Alors adapté pour les sols cohérents (argile molle, vase, tourbe),
Si argile raide	Alors Scissomètre n'est adapté,
Si paramètres mécaniques	Alors échantillon intact

Si pénétromètre	Alors toléré dans les sables
Si sol sableux	Alors essai CD (essai de cisaillement)
Si carottage par block	Alors profondeur est inférieure à 4 mètres
Si (argile, marnes)	Alors terrain cohérent
Si (sables-argileux, tourbe)	Alors terrain cohérent
Si Spt	Alors adapté pour les sols pulvérulents,
Si enfouissement est < 30cm (Spt) et nombre de coup =50	Alors essai arrêté
Si .....	Alors .....
Si essais de laboratoire	Alors adaptés aux sols cohérents

[fig 27]. Quelques règles brutes de vérification (Couche-Sondage-Essais)

### 3.2.3 Traitements sur l'ordre de grandeur par rapport à la couche

Ce traitement a pour prérequis la vérification de l'ordre de grandeur intrinsèque des paramètres [2.1]. On dispose alors d'un intervalle global lié au paramètre, indépendamment du matériau qu'il caractérise.

Connaissant maintenant le type de sol (sable, argile,...) composant la couche, cet intervalle se réduit. Il constitue une vérification plus précise du paramètre.

Principe: Si la nature de la couche = A  
Si le paramètre lié B = X  
Alors vérifier que  $\text{BorneInfBA} < X < \text{BorneSupBA}$

La borne inférieure (BorneInfBA) de l'angle de frottement  $\phi$  (B) pour le sable (A)  $> 35^\circ$   
La borne supérieure (BorneSupBA) de l'angle de frottement  $\phi$  (B) pour le sable (A)  $< 40^\circ$

En raison de la multiplicité des cas possibles de nature de sol, les règles sont mieux adaptées à ce type de vérification.

Nous prenons comme exemples:

- les limites d'Atterberg,
- la valeur de l'angle de frottement,
- la valeur de la cohésion.

La vérification intrinsèque du paramètre est faite suivant les intervalles suivants :

la limite de liquidité:	$0 < w_L < 400 \%$
l'angle de frottement	$0 < \phi < 45^\circ$
cohésion	$0 < C < 1000 \text{ Kpa}$



La vérification par rapport à la couche donne:

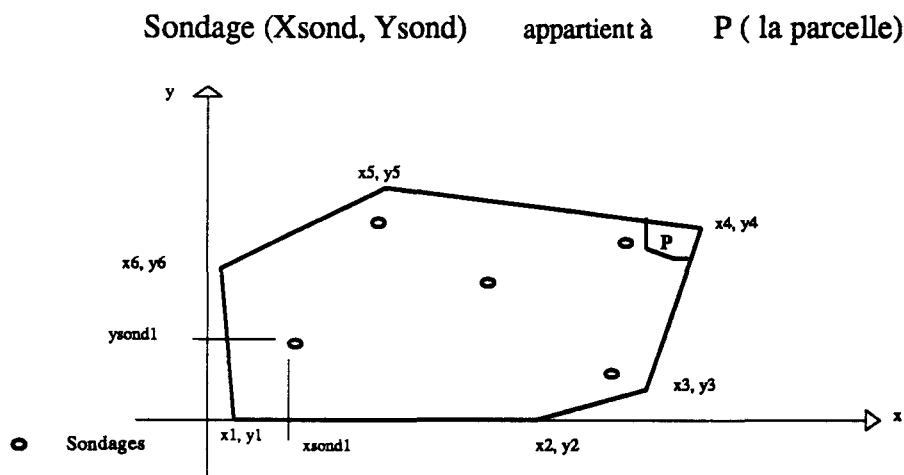
pour le sable la limite de liquidité:	$w_L < 35\%$ ,
l'angle de frottement	$35 < \phi < 40^\circ$
la cohésion	$C = 0$
pour le limon la limite de liquidité:	$20 < w_L < 60 \%$ ,
l'angle de frottement	$25 < \phi < 30^\circ$
la cohésion	$20 < C < 50 \text{ Kpa}$
pour l'argile :	$w_L > 30\%$ .

### 3.2.4 Traitements concernant les vérifications sur les données géométriques

Nous avons fait porter cette vérification sur deux points:

- la localisation d'un sondage par rapport à la parcelle [fig 28],
- la profondeur de prélèvement de sol (destiné à un essai de laboratoire) par rapport à la configuration des différentes couches identifiées par sondage.

Le principe consiste à appliquer un algorithme vérifiant que la position des sondages est à l'intérieur de la parcelle; les entrées de cet algorithme sont les sommets du polygone définissant la parcelle et les coordonnées du sondage.



[fig 28]. Appartenance d'un sondage à la parcelle

### 3.2.5 Traitements concernant les corrélations entre les caractéristiques géotechniques

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 2 de la première partie, notre but est non pas de proposer des corrélations mais d'exploiter avec prudence les différentes corrélations que nous avons recensées [FAVRE, 72, 80], [BIAREZ et al, 89], [CASSAN, 79, 88],....

Jusqu'à présent nous avons présenté les vérifications faites par rapport à l'ordre de grandeur du domaine d'un seul paramètre et on a vu comment son domaine de validité s'affine.

Or, en pratique on a besoin de plusieurs paramètres.

Parmi les paramètres physiques qui décrivent les propriétés des sols, certains sont reliés par des expressions mathématiques intangibles; par exemple, le poids volumique déjaugé ( $\gamma$ ) est relié au poids volumique du sol saturé ( $\gamma_{\text{sat}}$ ) et de l'eau ( $\gamma_w$ ):

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$$

Prenons un autre exemple toujours sur les paramètres physiques : la teneur en eau ( $W$ ) est liée à l'indice des vides ( $e$ ), au degré de saturation ( $S_r$ ), au poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) et des grains ( $\gamma_s$ ) par la relation:

$$W = e \gamma_w S_r / \gamma_s \quad \text{en vérifiant que} \quad \gamma_s > \gamma_{\text{sat}} > \gamma > \gamma_d > \gamma'$$

A partir de ces cinq paramètres liés ( $\gamma$ ,  $\gamma_s$ ,  $S_r$ ,  $e$ ,  $w$ ) on peut calculer d'autres paramètres, donner par exemple une estimation sur la classe de sol, sur sa consistance,...

Dans ce cas les paramètres sont liés par des expressions mathématiques; les procédures de déductions de paramètres à partir d'autres paramètres sont de type algorithmique; elles sont attachées aux différents attributs par l'intermédiaire des démons.

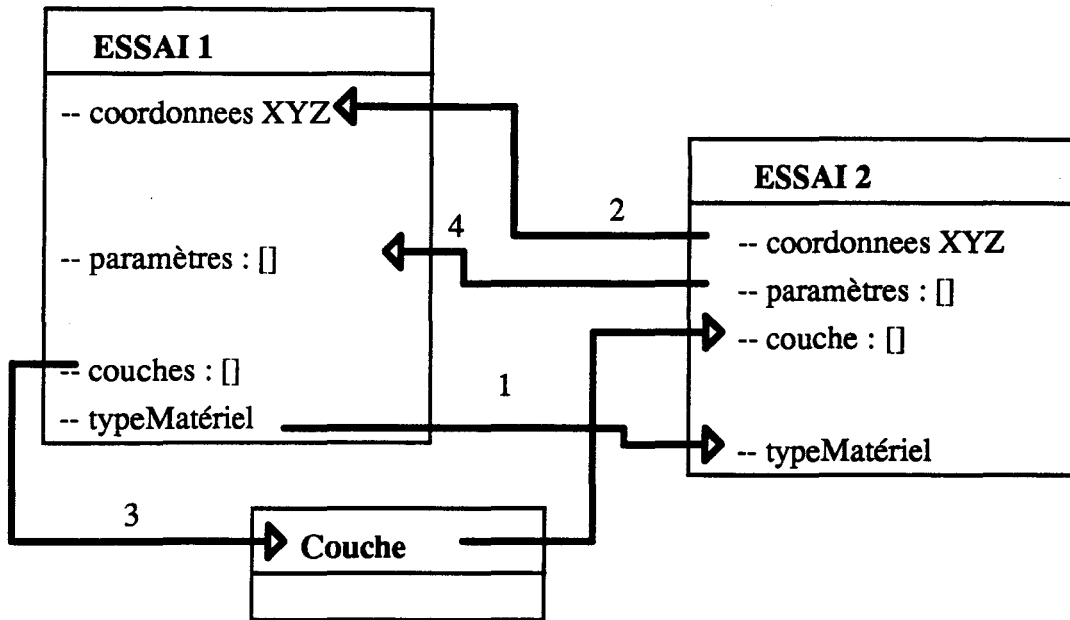
Pour les paramètres reliés par des corrélations, les procédures sont différentes et consistent à :

- vérifier la cohérence des données de deux ou plusieurs essais différents sur une même couche,
- vérifier les données saisies par rapport à celles déjà acquises (paragraphe 3.2.6),
- déduire des données supplémentaires sur le sol, si les corrélations sont fiables avec l'aide de l'utilisateur [BOULEMIA et al, 91]<sup>4</sup>.

Dans les deux premiers cas, l'utilisation des corrélations sert principalement à sensibiliser l'utilisateur sur les valeurs des paramètres saisies; par contre pour le dernier cas concernant la déduction des données supplémentaires, les traitements ne seront enclenchés que si ces conditions sont vérifiées [fig 29]; le principe est le suivant:

- 1: dans le cas général, on commence tout d'abord par vérifier s'il y a des relations entre ces deux types de matériels; si oui on passe à l'étape 2 sinon on ne déduit rien.
- 2: on relève les coordonnées des essais pour déterminer les cotes.
- 3: en fonction des cotes, on compare les couches; si elles sont comparables on passe à l'étape 4 sinon on arrête.
- 4: on compare alors les valeurs d'attributs.

Après acceptation de l'utilisateur des valeurs déduites, on associe à ces mêmes valeurs un coefficient de précision introduit par l'utilisateur.



[fig 29]. Principe de corrélation

Nous avons regroupé ci-dessous les essais [fig 30] pour lesquels les résultats peuvent être corrélables:

<p><b>"laboratoire"</b> -</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>paramètres dimensionnels</li> <li>Granulométrie</li> <li>Triaxial</li> <li>Boite</li> </ul>	<p><b>"laboratoire"</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>paramètres sans dimension,</li> <li>oedomètre,</li> <li>Granulometrie</li> <li>Granulometrie</li> </ul>
<p><b>"in-situ"</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pénétromètre dynamique</li> <li>Pénétromètre statique</li> <li>SPT</li> <li>SPT</li> <li>SPT</li> <li>Pénétromètre statique</li> <li>Scissomètre</li> </ul>	<p><b>"in-situ"</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pressiomètre</li> <li>Pressiomètre</li> <li>Pressiomètre</li> <li>Pénétromètre dynamique</li> <li>Pénétromètre statique</li> <li>Pénétromètre dynamique</li> <li>Pressiomètre</li> </ul>
<p><b>"in-situ"</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Scissomètre</li> <li>SPT</li> </ul>	<p><b>"laboratoire"</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pénétromètre Statique</li> <li>Granulométrie</li> </ul>

[fig 30]. Essais dont les résultats sont corrélables

Nous exprimons ci-dessous les paramètres pouvant être reliés par des fonctions dont l'expression analytique est classique [fig 31]:

essai	essai	fonction
Pénétrömètre dynamique	Pressiomètre	$q_d - p'_0 / P_1 - p_0$ ,
Pénétrömètre statique	Pressiomètre	pointe, $q_c$ , $p'_0$ , $p_l - p_0$ ,
		$q_c$ , $E$ ,
SPT	Pressiomètre	$N$ , $p_l - p_0$ , couche,
		$N$ , $E$ , couche,
SPT	Pénétrömètre dynamique	$N$ , $q_d$ , couche,
SPT	Pénétrömètre statique	$N$ , $R_p$ ,
Pénétrömètre statique	Pénétrömètre dynamique	$q_d$ , $q_c$ , couche,
Scissomètre	Pressiomètre	$C_u$ , $p_l - p_0$ ,
Scissomètre	Pénétrömètre Statique	$C_u$ , $q_c$ ,
perméabilité	granulométrie	$k, d_{10}$

[fig 31]. Fonctions de corrélation

Pour utiliser ces relations, on doit tenir compte non seulement des relations entre les paramètres mais aussi du type de matériel et des couches traversées.

Nous illustrons ces relations à travers quelques valeurs présentées sur la figure 32 de [CASSAN, 88]:

Corrélation	Argiles	Limons	Sables	Sables et graviers	Observations
$q_d/N$	0,2	0,2 à 0,3	0,4	0,8	
$q_d/p_l - p_0$	3 à 4				au dessus de la nappe

[fig 32]. Exemples de corrélation [CASSAN, 88]

Autre exemple, selon Nuyens [NUYENS, 73], d'une manière générale dans les sols purement pulvérulents le rapport de la résistance de pointe d'un pénétrömètre dynamique sur la pression limite d'un essai pressiométrique ( $q_d/p_1$ ) sera également fonction de l'angle de frottement ( $\phi$ ) puisque  $P_1$  est une fonction de l'angle de frottement; dans ce cas  $q_d$  peut être exprimé comme une fonction de l'angle de frottement [fig 33]. A cet effet il propose:

$\phi^\circ$		$q_d/p_1$	
10	2,3	à	3,1
20	3,6	à	4,7
30	5,5	à	7,3
50	14,7	à	19,6

[fig 33]. Exemple de corrélation [NUYENS, 73]

### Exemple d'utilisation de corrélation

Si par application d'une corrélation entre des caractéristiques issues d'un essai pénétrométrique et d'un essai Standard Pénétration Test [fig 34], on a constaté une certaine correspondance globale et que pour une ou quelques valeurs ce n'est pas le cas, on propose à l'utilisateur de modifier l'une ou l'autre valeur. Nous présentons ci dessous un exemple illustrant cette situation:

couche	Essai SPT nombre de coups N	Essai pénétrométrique résistance statique	
sable fin	19	9400	
	20	9600	
	24	9800	
	11	12000	R1
	21	10000	
limon	3	900	
	9	1800	
sable et graviers	19	9400	
	23	10200	
argile avec graviers	27	8200	
	50	8500	

[fig 34]. Résultats d'essais

**R1:** la valeur a été acceptée par la vérification intrinsèque [3.2.1] et la vérification par rapport à la couche [3.2.3]; une troisième vérification consiste à affiner le résultat.

A partir de plusieurs cas de corrélation, Cassan [CASSAN, 88] propose la synthèse présentée sur la figure 35:

argiles	qc = 0.1N	à	0.2N
argiles limoneuses	qc = 0.2N	à	0.3N
argiles sableuses	qc = 0.3N	à	0.4N
sables	qc = 0.3N	à	0.6N
sables argileux ou limoneux	qc = 0.35N	à	0.45N

A noter que la valeur de la résistance statique (qc) est en Mpa.

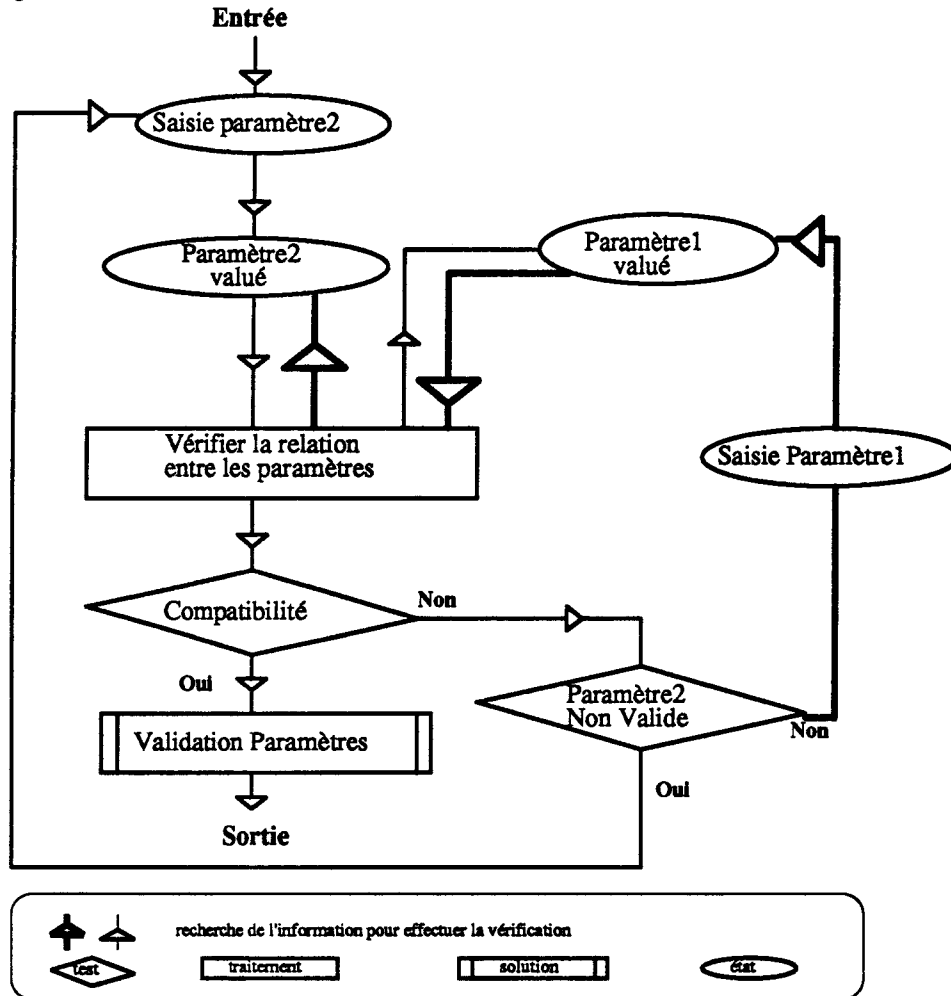
[fig 35]. Rapport de corrélation Spt-pénétromètre statique

A partir de ces rapports on propose une aide à la vérification et à la déduction ou précisément une correction puisque le terme déduit est très délicat dans ce contexte.

### 3.2.6 Traitements concernant la vérification des caractéristiques d'un même essai

Ces traitements sont à rattacher aux paramètres, et concernent les différents paramètres d'un même essai.

Le principe consiste à vérifier le rapport existant entre les paramètres selon l'organigramme suivant [fig 36]:



[fig 36]. Principe de vérification de paramètres

L'exemple suivant [fig 37] montre la vérification des caractéristiques d'un essai pressiométrique:

prof	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E	5	2	2.5	3	10	12	9	7	8	12
pl	0.6	0.2	0.25	0.3	1.2	1.5	1.1	0.6	1	1.3
Couche	limon sableux			sables et graviers			marne calcaire			

fig [37]. Résultat d'un essai pressiométrique

Le traitement pour cet exemple, concerne la vérification du rapport  $E/pl$ .

Le rapport de  $E/pl$  pour la première couche est égal respectivement à 8.33, 10, 10, 10, valeurs acceptables puisque le rapport pour les sables est :  $7 < E/pl < 9$  et pour les limons ce rapport est:  $8 < E/pl < 14$ .

Si ce rapport  $E/p_l$  avait été inférieur à 5, on aurait pu affirmer qu'il y a eu un remaniement au forage; ainsi, les valeurs peuvent être remises en cause.

### Remarque concernant la corrélation entre paramètres pressiométriques

Nous savons, selon Van Wambeke et Cassan [VAN WAMBEKE ,74], qu'il existe une corrélation entre le module E et la pression limite pressiométrique, bien qu'il n'existe pas de relation théorique entre E et  $P_l$ , puisque ces caractéristiques sont toutes deux de nature différente.

Les auteurs pensent pourtant que la valeur du rapport  $E/P_l$  est une meilleure caractéristique d'un type de sol que ne le sont les valeurs de E et  $P_l$  prises séparément. Le rapport de  $E/P_l$  varie entre 5 et 30 selon le type sol.

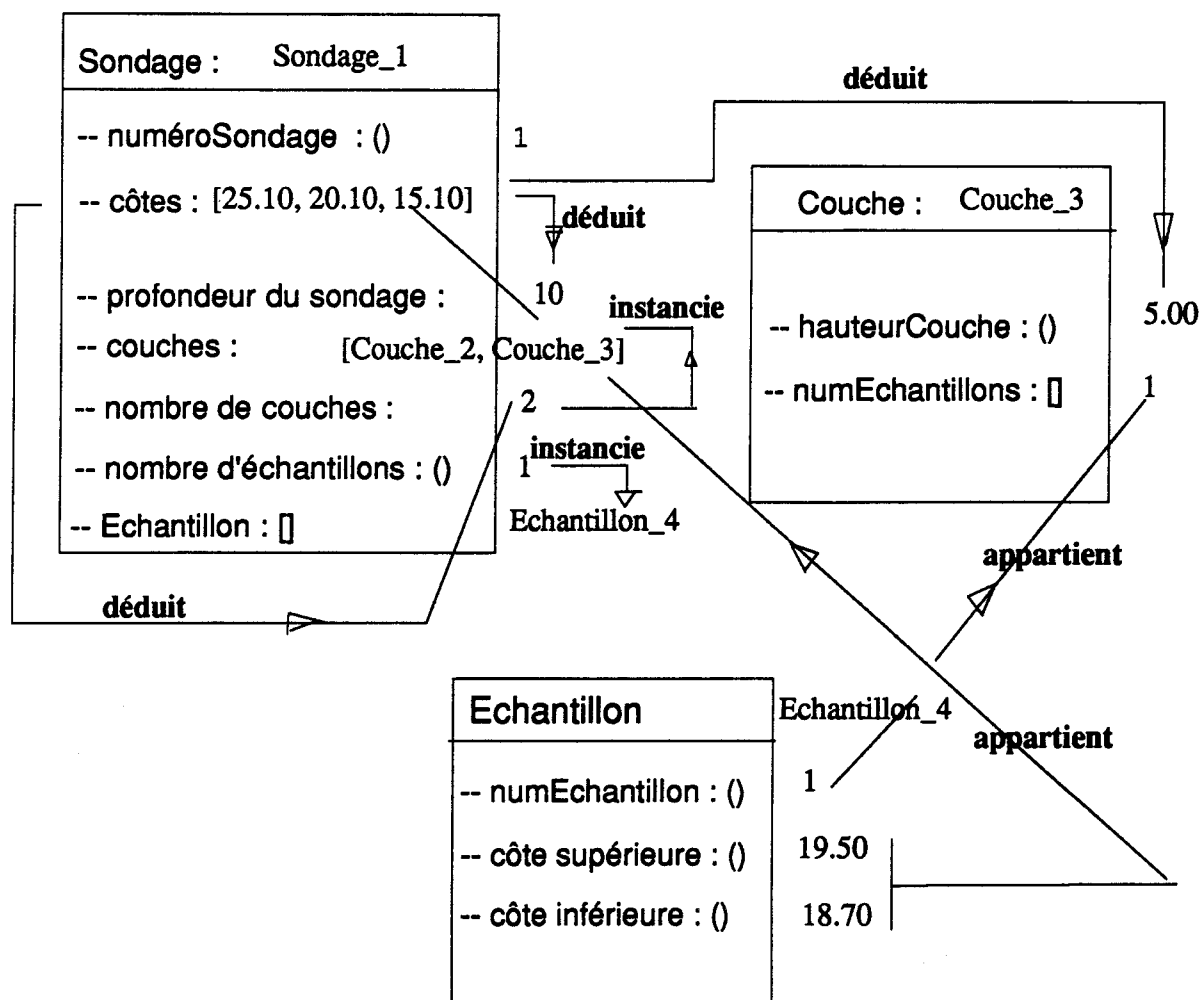
Pour la corrélation entre la pression limite ( $P_l$ ) et la pression de fluage ( $P_f$ ) les deux auteurs proposent:

<p>[CASSAN, 88]</p> $\frac{p_l - p_0}{p_f - p_0} \approx 1,7 \text{ pour tout type de sol,}$	<p>[VAN WAMBEK, 74]</p> $\frac{p}{p_l} \approx 1,8 \text{ pour le limon,}$ $\approx 1,7 \text{ à } 2,25 \text{ pour tout type de sol.}$
--	---

[fig 38]. Exemples de corrélations

### 3.2.7 Traitements concernant les attributs d'objets différents

Ces traitements sont réalisés sur les objets ainsi que sur leurs attributs pour maintenir la cohérence de la base de connaissances; les objets et attributs mis en cause sont présentés sur la figure 39. Ces traitements sont réalisés par des démons (chapitre 4).



[fig 39]. Maintien de la cohérence entre les objets et les attributs

Traitement de:

**Déduction:** le nombre de couches, la profondeur et la hauteur de couche sont déduits des cotes de sondage.

**Instanciation:** les objets échantillons sont instanciés connaissant le nombre d'échantillons; le nombre de couches permet d'instancier les objets couches.

**Appartenance:** l'échantillon numero\_4 appartient à la couche\_3; à partir de cote supérieure et cote inférieure on vérifie l'appartenance de l'échantillon à une ou deux couches.

### 3.2.8 Les traitements diminuant les incertitudes

Les traitements qui suivent permettent d'éliminer les erreurs et de diminuer les incertitudes.

Avant de présenter les différents types de traitements, nous pouvons faire la remarque suivante: les procédures de vérification reposent sur deux types d'informations:

- symboliques (molle, peu-consistant, adapté, non-atteint, consolidée,...),
- numériques (valeurs des paramètres physiques et mécaniques);



A partir d'informations numériques on peut déduire une information symbolique (exemple 1); le contraire est plus délicat à mettre en place en raison de la subjectivité du jugement de valeur.

On peut par contre dans certain cas déduire une relation ou une condition faisant intervenir des paramètres quantifiés à partir d'une information symbolique (exemple 2).

exemple 1:

*Si*  $5 < I_p < 25$   
*Alors* *CaractèreDominant = limoneux*

exemple 2:

*Si* *EtatConsolidation = surconsolidé*  
*Alors* *pression consolidation > contrainte effective verticale*

Notre contribution dans ces traitements est minime; nous pouvons les différencier selon cinq types:

- vérification sur les valeurs de paramètres indépendamment de toute considération;  
 (paragraphe 3.2.1)
- vérification sur les valeurs de paramètres selon la nature de la couche;  
 (paragraphe 3.2.3)
- vérification des valeurs de paramètres d'un essai par rapport à des valeurs de paramètre d'autres essais selon des relations connues;  
 (paragraphe 3.2.5 et 3.2.6)
- vérification de la compatibilité de l'essai par rapport à la nature de l'échantillon, son état (intact, remanié, diamètre, qualité, ...) et le sondage.  
 (paragraphe 3.2.2)
- autres vérifications (exemple 1 et 2); nous donnons d'autres exemples représentatifs qui font une synthèse de différents traitements.

SI l'outil utilisé est conforme au type de sondage  
 SI le type de sondage est conforme à la couche  
 ALORS le sondage est **adapté**

SI l'état de l'échantillon **intact**  
 SI le mode de prélèvement est par **bloc**  
 SI la qualité de l'échantillon est **bonne**  
 SI la récupération est de **100%**  
 ALORS l'essai est **adapté**

SI **la couche est adaptée à l'essai**  
 ALORS la confiance accordée à l'essai est de **100%**

A partir de ces règles nous verrons comment la confiance associée à l'essai peut être stable ou diminuer:

SI	l'outil utilisé est conforme au type de sondage
SI	le type de sondage est conforme à la couche ( <b>ici argile molle</b> )
ALORS	le sondage est <b>adapté</b>
SI	l'état de l'échantillon est <b>intact</b>
SI	le mode de prélèvement est par <b>tube</b>
SI	la qualité de l'échantillon est <b>bonne</b>
SI	la récupération est de <b>100%</b>
ALORS	l'essai est <b>adapté</b>
SI	<b>la couche est adaptée à l'essai</b>
SI	l'essai est un essai de cisaillement
ALORS	la confiance accordée à l'essai est de <b>?</b> (sachant que pour un essai de cisaillement la résistance de cisaillement est réduite jusqu'à 30%)

Dans le principe, les paramètres de confiance sont estimés en fonction des conditions d'essais. Actuellement nous n'avons pas assez d'expertise pour estimer une confiance différente de 100%; néanmoins dans ce cas, nous faisons intervenir le jugement de l'utilisateur. Dans tous les cas nous laissons la possibilité à l'utilisateur de modifier la valeur de la confiance.

### 3.2.9 Traitements concernant la vérifications sur des essais identiques sur une même couche

Pour associer une précision à une valeur moyenne de paramètre, on utilise une approche probabilité statistique classique; elle permet de quantifier l'incertitude liée à un paramètre de sol.

Prenons l'exemple de cinq essais pressiométriques qui nous ont été proposés, l'ensemble des valeurs de pression limite (Pl) dans la couche marno-calcaire est illustré figure 40; dans ce tableau on a indiqué la valeur de confiance de chacun des essais.

	PR10	PR11	PR12	PR13	PR14
	0.57	0.57	0.56	0.60	0.61
	0.43	0.42	0.40	0.44	0.45
marno-	0.71	0.73	0.69	0.69	0.72
calcaire	0.79	0.80	0.80	0.78	0.77
	0.78	0.79	0.78	0.69	0.70
	0.32	0.32	0.32	0.29	0.28
	1.10	1.11	1.12	1.09	1.08
confEssai	100	90	95	92	99

[fig 40]. Tableau des valeurs de Pl et des valeurs de confiance associées à chaque essai

Les traitements selon l'approche statistique portent sur:

- la détermination des valeurs minimales et maximales (plmin, plmax),
- le calcul du coefficient de variation et de la variance (plcoeffVar, plVar),
- le calcul des différentes moyennes (arithmétique, géométrique, harmonique, quadratique),
- le calcul de la moyenne pondérée; pondération faite avec la confiance associée à l'essai [fig.40].

Nous proposons ainsi à l'utilisateur un ensemble de résultats [fig 41]:

Pressiometres	
-- numEssais :	[PR10,PR11,PR12,PR3,PR14]
-- typepres :	Meurisse
-- intervalle :	2
.....	
-- plmin :	[0.56,0.4,0.69,0.77,0.69,0.288,1.08]
-- plmax :	[0.61,0.45,0.73,0.805,0.79,0.326,1.12]
-- plmoy :	[0.5824,0.428,0.709,0.789,0.749,0.3098,1.1]
-- plcoeffVar :	[0.033,0.04,0.021,0.016,0.06,0.055,0.013]
-- plVar :	[0.0357,0.0296,0.0224,0.0164,0.0196,0.0293,0.02]
-- plgeo :	[0.582,0.4276,0.708,0.7888,0.7476,0.3092,1.099]
-- plpond :	[0.5825,0.4282,0.7089,0.7888,0.7488,0.3097,1.099]
-- plquad :	[0.5827,0.4283,0.7091,0.7891,0.7503,0.3102,1.1]
-- plharm :	[0.5817,0.4272,0.7086,0.7887,0.7463,0.3088,1.099]

[fig 41]. Résultats statistiques de la pression limite (MPa)

### 3.2.10 Contrôle de la validité d'une valeur déduite

Le principe consiste à effectuer des vérifications sur les résultats de déduction d'objets, des paramètres et éventuellement des deux; avant de les considérer acquises par le système, l'utilisateur est sollicité pour valider les valeurs déduites automatiquement. Nous utilisons ici des réflexes chargés de vérifier leur cohérence avec les informations déjà contenues dans le projet.

### 3.3 TRAITEMENTS A PARTIR DE CAS DE SOLS BIBLIOGRAPHIQUES

Pour enrichir les traitements de données, nous avons réalisé une bibliothèque de cas de sol construite à partir d'études bibliographiques sur des cas de sol connus.

L'étude bibliographique des cas de sol a pour but de recueillir et synthétiser les caractéristiques physiques et mécaniques des différentes couches de sol et cela pour sa réutilisation pour la vérification des couches de sol [BOULEMIA, 91]<sup>1</sup>.

Indépendant des objets du projet à un instant donné, cette bibliothèque regroupe dans un seul objet les différents cas recensés.

#### 3.3.1 Traitement

Cette bibliothèque permettra de faire des comparaisons entre les cas de sol recensés et les couches introduites pour un traitement donné et de juger de la cohérence des informations.

Cette vérification se fera, par exemple, sur les relations entre la désignation de la couche et les paramètres physiques et mécaniques introduits pour la caractériser.

#### 3.3.2 Origine des cas de sol

L'idée au départ était d'associer une valeur de précision aux différents attributs d'un projet donné mais très vite nous nous sommes heurtés à une grande hétérogénéité de résultats bibliographiques ce qui a déjà été observé et analysé par différents auteurs [VAN WAMBEKE, 74], [FAVRE, 72, 80], [BOISSIER, 83],...; de plus, le recensement exhaustif de ces informations dépasserait largement le cadre de notre travail.

Nous nous sommes alors orientés vers des cas de sol très bien définis par leurs paramètres physiques et mécaniques; ces cas d'école proviennent de thèses [FAVRE, 72,80], de classifications de sol [SETRA-LCPC, 92], et d'ouvrages de référence [CASSAN, 88], [COSTET et al, 88],...

#### 3.3.3 Structuration et organisation

Afin d'alléger les traitements, nous avons défini des structures types par technique (terrassement, calcul des fondations,...)

La structure et l'organisation des cas de sol seront reprises au chapitre 2 de la troisième partie; nous présentons ci-après la structure représentative des différents paramètres physiques et mécaniques d'un cas de sol connu pour une application fondation [fig 42]

<p>Nom de la couche :</p> <p>origine:(information sur la provenance de cette couche),</p> <p>paramètres mécaniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>cohésion,</li> <li>angle de frottement,</li> <li>module oedométrique,</li> <li>pression limite,</li> <li>module pressiométrique</li> <li>résistance dynamique,</li> </ul>
---

résistance statique, coefficient de compressibilité. paramètres physiques : poids volumique, teneur en eau, indice des vides ...
--

[fig 42]. Exemple de structure pour le calcul des fondations

### 3.3.4 Volume et diversité

Les différents cas de sol recensés proviennent principalement des cas d'école; nous avons recensé ces différentes couches selon la structure présentée ci-dessus. Leur domaine d'utilisation concerne le calcul des fondations, et principalement les travaux de terrassement et VRD.

Actuellement, nous avons 60 cas de sol dont une vingtaine sont définis par leurs paramètres physiques et mécaniques.

### 3.3.5 Exemple de cas de sol

Nous présentons deux exemples de cas de sol connus [fig 43]:

Argile molle	Limon
$C = 5 \text{ Kpa}$	$25^\circ < \phi < 30^\circ$
$\phi = 10^\circ$	$20 < C < 50 \text{ KPa}$
$\gamma = 17 \text{ KN/m}^3$	$15 < E < 150 \text{ Kpa}$
$E_{\text{oed}} = 2.7 \text{ MPa}$	$10^{-3} < K < 10^{-7}$
$E = 2 \text{ MPa}$	
$PI = 200 \text{ Kpa}$	
$R_d = 0.7 \text{ MPa}$	
$q_c = 0.7 \text{ MPa}$	

[fig 43]. Deux cas de sol connus

### 3.3.6 Non exhaustivité, évolution, connexion

Cette bibliothèque sera auto-enrichissante puisque, à chaque nouveau traitement, elle sera complétée par le cas de sol du projet en cours sous le contrôle de l'utilisateur si la cohérence de la base peut être assurée.

Il apparaît possible d'aller puiser les informations dans une banque de données existante à condition de vérifier au préalable les données des bases de la banque à travers notre système.

### 3.3.7 Scénarios possibles d'utilisation

Ces scénarios n'ont pas été implémentés; une première analyse permet de proposer le scénario suivant:

L'objectif dans un premier temps est de trouver dans la bibliothèque de cas de sol un cas ressemblant au cas de sol du projet.

Cette recherche s'effectue en premier sur les caractéristiques physiques uniquement;

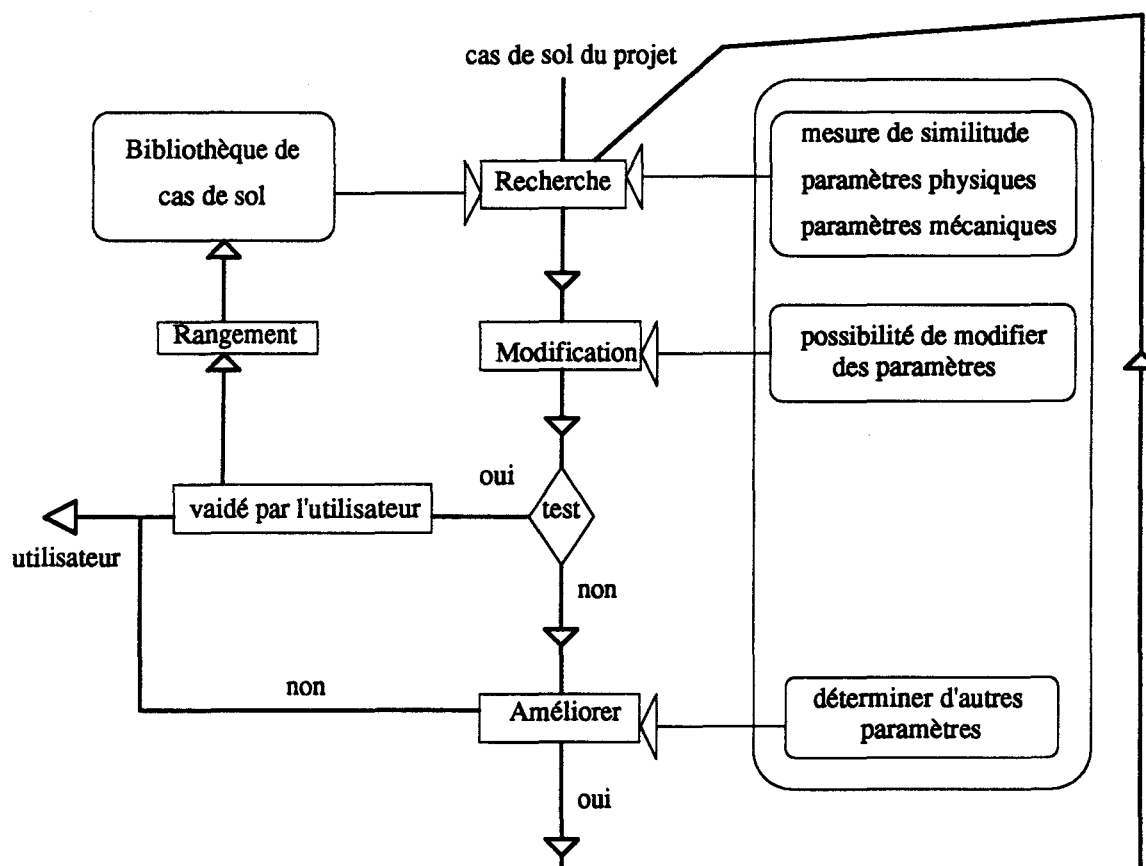
S'il n'y a pas de cas ressemblant dans la bibliothèque la recherche est abandonnée;

Sinon cette recherche s'effectue alors selon les caractéristiques mécaniques;

S'il n'y a pas de résultat alors la recherche est abandonnée;

Sinon le cas de sol est jugé cohérent car ressemblant à un cas de sol dans la bibliothèque.

Dans les deux autres cas, il faut avoir d'autres informations [fig 44].



[fig 44]. Principe de l'utilisation de la bibliothèque

Nous avons favorisé les paramètres physiques car les paramètres mécaniques sont liés au manque de vraisemblance dans leur domaine de variation et surtout à l'impossibilité de cerner un sol dans un domaine strict puisque la présence ou non de l'eau par exemple influe beaucoup sur les paramètres physiques et mécaniques.

L'intérêt concernant l'utilisation de cette bibliothèque est double: la réutilisation des données fiables pour étudier un projet et la réelle possibilité de constituer une banque de données valide.

### 3.4 SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Notre travail consistait à l'élaboration d'une maquette d'un système à base de connaissances sur le sol et ceci a nécessité d'être exhaustif au niveau des objets couramment utilisés.

Nous avons abordé dans ce chapitre les traitements qui ont fait l'objet de notre étude et qui nous permettent l'analyse de cohérence de la base. Nous partons d'une base d'informations brutes sur le sol pour aboutir à une base d'informations élaborées.

D'autres traitements sont alors envisageables en fonction de l'application souhaitée.

Nous présentons ici le principe d'un module que nous appellerons 'Traite-couche' qui peut être connecté à notre système; l'objectif est d'aider le concepteur à valider de manière interactive une proposition de modèle de sol, et lui fournir à tout endroit de la parcelle une estimation des caractéristiques.

#### Les données

Les données de départ sont:

- les données élaborées prétraitées par l'analyse de cohérence,
- la distance entre les implantations d'essais et de sondages (faible à l'échelle de la parcelle),
- la présence du substratum, paramètre important puisque sa présence ou non influe énormément sur l'ouvrage à réaliser,
- la succession des couches dont la description doit être la plus fine possible afin d'éviter certaines simplifications aux conséquences fâcheuses.

La succession des étapes de traitement est la suivante [fig 45]:

- la superposition des coupes de sondage,
- la déduction de la configuration du sol,
- et le maillage du toit des couches.

#### Superposition

La méthode retenue pour construire cette superposition, consiste à réaliser des coupes suivant chaque direction pour établir les profils de la succession des couches rencontrées.

Ce module superpose les différents sondages ou essais in-situ réalisés et compare les différentes couches qui composent le sol (étape 1).

#### Déduction

Le résultat de la superposition permet de définir la configuration des couches.

Différents cas sont envisagés:

- les cas de configuration les plus simples sont dus uniquement aux pentes des couches,
- les plus complexes sont dus à l'existence d'anomalies (faille, discontinuité, cavité,..., cas de très forte pente); ces cas nécessitent la demande d'informations complémentaires;
- des cas intermédiaires sont possibles (étape 2).

Trois cas de figure se présentent donc selon la prévision de la configuration:

*Configuration vraisemblable*: Il y a continuité des couches; le système propose un modèle continu.

*Configuration ambiguë*: Il y a ambiguïté; le système propose plusieurs modèles et l'utilisateur validera le plus vraisemblable.

*Configuration indéterminée*: Il n'y a pas assez d'informations cohérentes pour proposer un choix; l'utilisateur doit introduire de nouvelles informations pour lever l'indétermination.

Ces cas sont explicitement décrits par l'attribut 'configuration' de 'Traite-couche'; cet attribut qualifiant la prévision de la configuration est attribué au projet traité en fonction des différents essais, de l'interprétation,...

### **Traite-couche**

-- configuration : ()

Type : [vraisemblable, ambiguë, indéterminée]

-- resultat : []

Type : Resultat

### **Maillage**

Dans le cas d'une solution adoptée et ambiguë, l'étape 3 est enclenchée; elle aboutit au maillage du sol représentatif des différentes couches de la configuration identifiée.

Avant d'arriver à ce maillage, nous allons reposer le but de 'Traite-couche':

Estimer quasiment en tout point de l'espace géographique (parcelle) la valeur d'une fonction qui n'est connue qu'en certains points de mesures.

Nos données sont d'ordre géométriques (toit d'une couche, profondeur,...) et géotechniques (cohésion, angle de frottement, poids volumique, pression limite,...).

Le deuxième attribut de 'Traite-couche' est 'resultat'; 'resultat' est un attribut de type objet 'Resultat'; il est multivalué. Il fournira les valeurs obtenues par les traitements sur une couche.

Chaque valeur de 'Resultat' correspondra à une couche reconnue dans la configuration de la coupe; dans l'objet 'Resultat' seront représentés les essais définissant la couche et la synthèse des mesures d'essais.

## **3.5 ENCHAÎNEMENT POSSIBLE DES TRAITEMENTS**

En fonction du niveau de conception ou de l'avancement de la définition du projet, les objets ne sont pas tous identiquement et complètement définis.

Il y a donc progression par étapes des informations imprécises ou incomplètes vers des informations plus précises; cette progression peut être linéaire comme itérative fig [45].

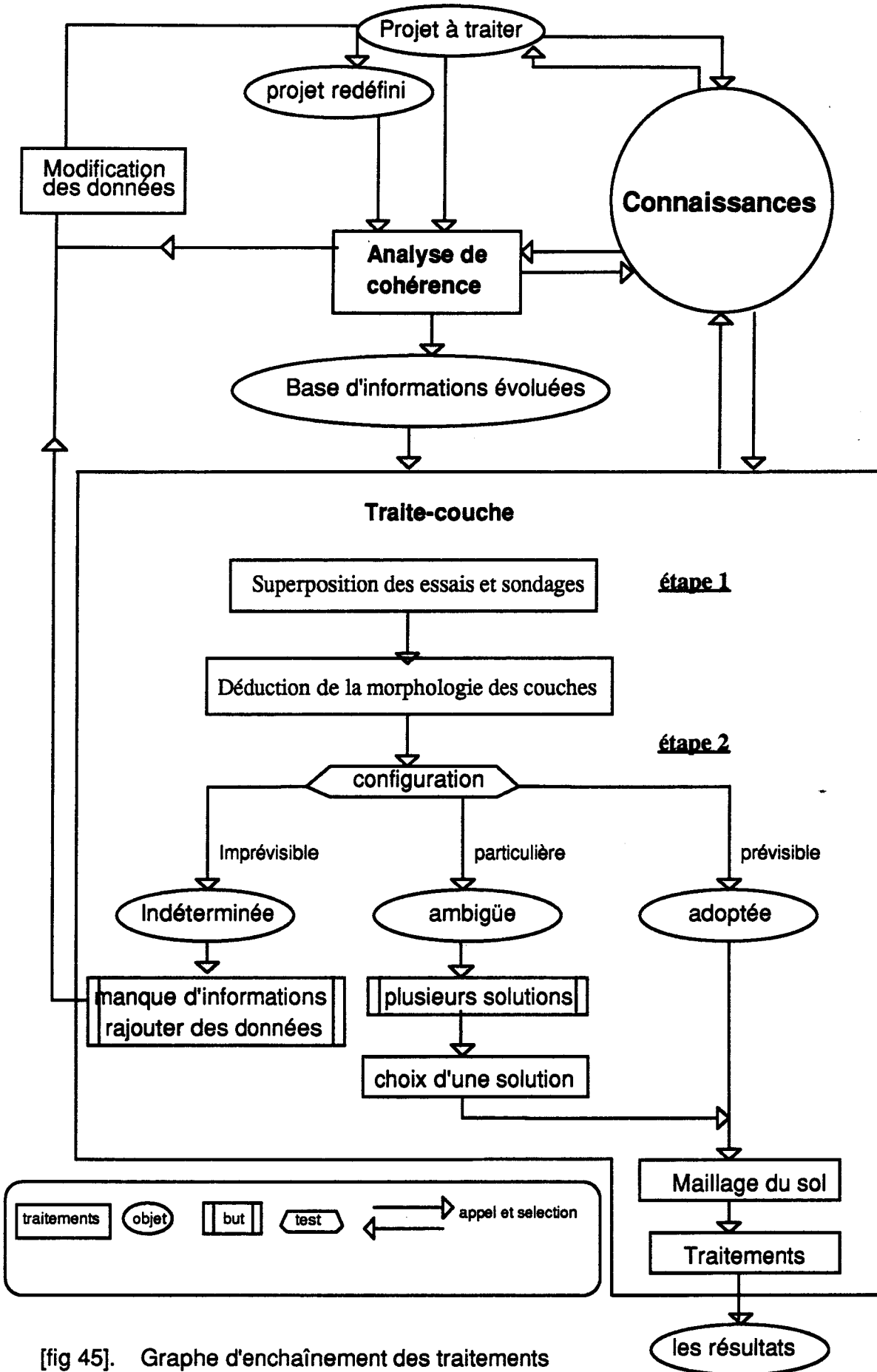
Les différentes étapes:

le traitement part des données brutes en provenance directe des essais; le travail consiste à éliminer des informations manifestement erronées, à déterminer les informations non corrélables et enfin à croiser les paramètres différents, résultats de plusieurs essais identiques. Cette phase permet de détecter une incohérence éventuelle entre le type d'une couche et la valeur d'un ou plusieurs paramètres pour cette couche.

Elle consiste à une mise en forme des données ou à un apport d'un complément en fonction de chacun des traitements que souhaitent rendre actifs l'utilisateur (**Analyse de cohérence**).

Toujours en fonction des traitements à activer, l'affinage du modèle précédent fournira un nouveau modèle qui permettra la connaissance du sol et la qualité des données quasiment en tout point (**Traite-Couche**).





[fig 45]. Graphe d'enchaînement des traitements

### **3.6 LES LIMITES DES TRAITEMENTS**

Elles concernent la non exhaustivité des traitements.

Nous souhaitons recueillir d'avantage d'informations permettant d'enrichir la base de connaissances.

Une expertise plus poussée est donc souhaitable; elle permettra également de valider les traitements déjà mis en place.

### **3.7 CONCLUSION**

En fonction des traitements que l'utilisateur veut réaliser, nous avons montré dans ce chapitre l'interaction entre le modèle conceptuel défini au chapitre 2 et le modèle des traitements.

La comparaison des ordres de grandeur des paramètres évite les erreurs triviales de saisie.

L'usage des corrélations permet d'affiner la vérification de cohérence des caractéristiques nouvellement introduites par rapport à d'autres caractéristiques présentes dans la base.

L'introduction ou la modification d'une valeur de paramètre de sol entraîne la vérification d'une partie ou de l'ensemble de celles présentes dans la base à l'instant considéré ceci dans le but de passer de la non cohérence, si elle est constatée, à la cohérence de cette base.

La possibilité d'aider l'utilisateur pour attribuer une qualité ou une confiance à un sol donnée.

---

## CHAPITRE 4 : IMPLEMENTATION

### 4.0 PRESENTATION

Nous avons défini les objets et les traitements de manière indépendante; le modèle de coopération va préciser les façons d'associer objets et traitements.

Le modèle de coopération contient le recensement des différents utilisateurs, la description des objets qui les intéressent, la vision qu'ils en ont et la manière avec laquelle ils souhaitent les utiliser.

Nous évoquons ensuite le générateur de systèmes experts KOOL (Knowledge representation Objet Oriented Language).

Pour finir nous présentons la structure du système KBSOL, et l'implémentation des objets et traitements en justifiant les raisons du choix des méthodes, des réflexes et des règles.

### 4.1 LE MODELE DE COOPERATION

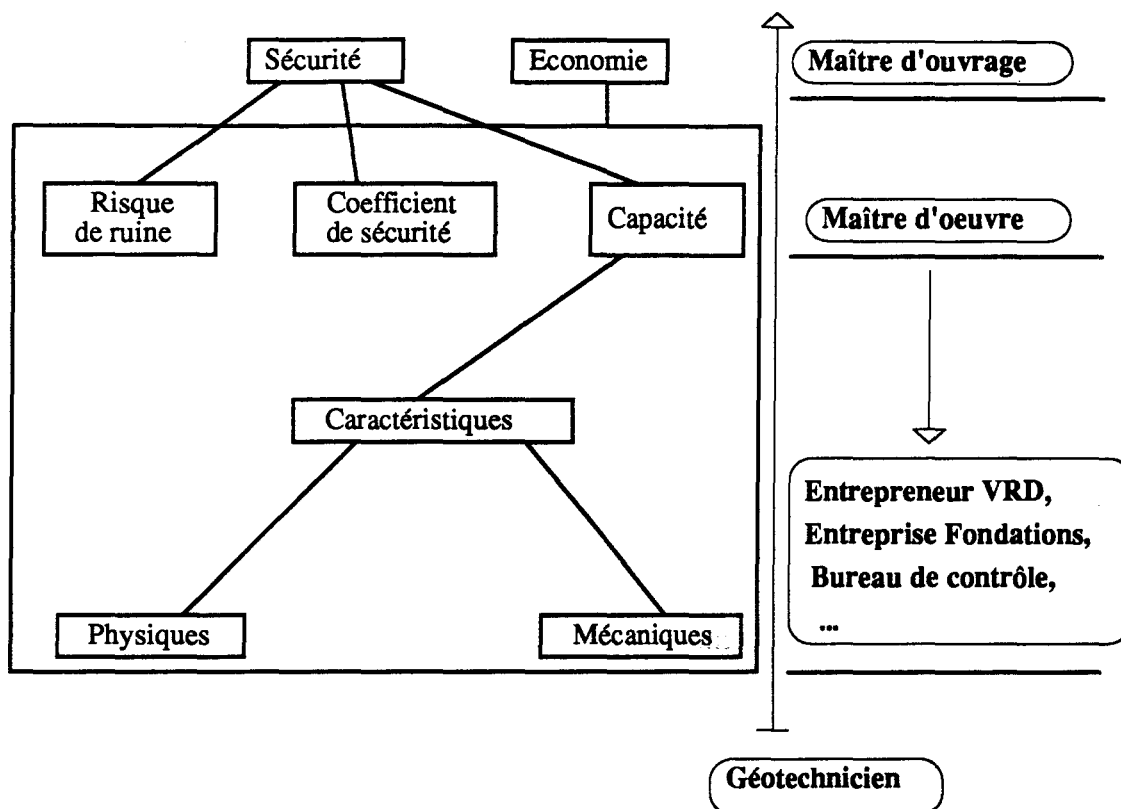
Le modèle de coopération dans le contexte de la méthodologie doit assurer:

- le respect de la spécificité des objectifs de chacun; par exemple, à partir du même point de départ -un nom de couche- on peut atteindre deux objectifs différents -paramètres mécaniques pour l'objectif vérification de portance et coefficient de foisonnement pour l'objectif réutilisation en remblai-
- le maintien des relations entre les paramètres du projet,
- l'aide à l'obtention de réponse, voire plusieurs réponses,
- le respect de l'évolutivité du processus d'adéquation des buts (par exemple profondeur d'un sondage) aux contraintes (profondeur par correspondance d'un essai pénétrométrique).

Il faut noter que le modèle de coopération n'est pas statique mais qu'il est en permanente évolution au cours du processus de conception.

#### 4.1.1 LES UTILISATEURS

Le *géotechnicien* est amené à traduire sa pensée de mécanicien des sols successivement dans des langages différents [fig 46] suivant le destinataire.



[fig 46]. Langage des intervenants

Ce schéma traduit les rapports entre le géotechnicien et ses interlocuteurs (maître d'ouvrage, maître d'oeuvre, BET, entrepreneur VRD) en terme de préoccupations.

Le *maître d'ouvrage* s'exprime en terme de sécurité et d'économie quel que soit le projet à réaliser (fondations, terrassement,...); sa demande est transmise au géotechnicien en général par le *maître d'oeuvre*: architecte ou *BET*.

Le maître d'oeuvre transcrit les préoccupations du maître d'ouvrage en termes techniques tels que risques de ruine, coefficient de sécurité, capacité; elle peut également être transmise au bureau de contrôle dans les mêmes termes.

Le véritable interlocuteur est le maître d'oeuvre; c'est dans son langage que la réponse doit être rendue, accompagnée d'un rapport d'étude de sol; il reste à sa charge de transcrire cette réponse, d'une part en termes de spécifications d'exécution pour les entrepreneurs et d'autre part en termes maître d'ouvrage.

Pour l'entrepreneur des VRD, la réponse est traduite sous forme des possibilités de l'utilisation de ce sol pour le positionnement des réseaux, de sa réutilisation en remblai, comme couche de formes pour les voiries,...

Pour les opérations spécifiques de terrassement, la nature du terrain conditionne la méthode de travail, le choix et le rendement des engins; la réponse doit être des recommandations d'utilisation du sol en remblai ou en couche de forme, ou une description du type de sol avec ses caractéristiques (angle de talus naturel, coefficient de foisonnement, volume des déblais,..).

La préoccupation de l'entrepreneur des fondations s'exprime en terme de type de fondation, de niveau d'assise, de type de coffrage,...

Une réponse concrète, est traduite à travers le couplage de notre travail avec un logiciel d'évaluation technico-économique EVALFOND [AL-HAJJAR, 89]; elle est présentée dans le chapitre 2 de la troisième partie.

A partir de cette analyse, on définit deux axes principaux:

- cerner les informations utilisées pour un traitement donné,
- utiliser ces informations pour attribuer des valeurs aux paramètres d'un autre problème.

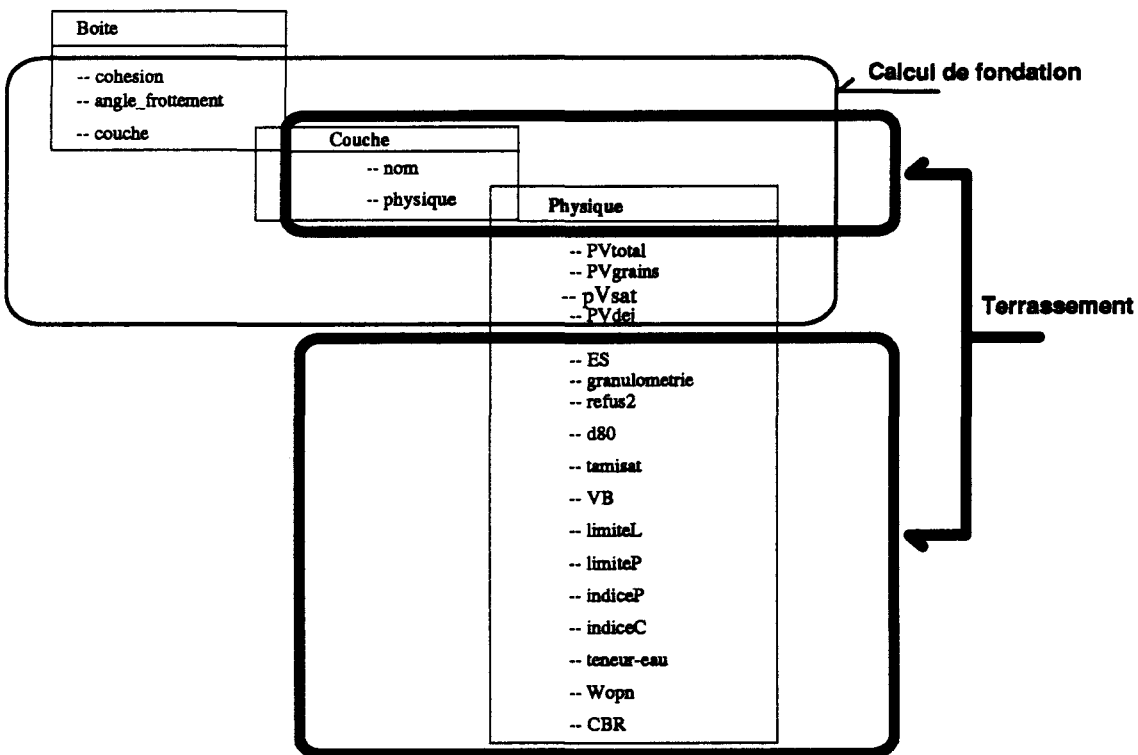
#### 4.1.2 SCENARI D'UTILISATION

Les scénarii d'utilisation dépendent de la préoccupation (fondation, terrassement,...) de l'utilisateur et des informations dont il dispose.

Kbsol regroupe toutes les informations sur le sol; pour une application donnée correspondant à un ou des scénarii particuliers, seule une partie de ces informations est utile [fig 47].

Pour une application terrassement, nous montrons ci dessous les informations qui sont susceptible d'intervenir.

Nous avons également fait ressortir celles qui interviendront pour une application fondation.



[fig 47]. Informations pour différents utilisateurs

## 4.2 STRUCTURE DE LA BASE DE CONNAISSANCES

Pour l'implémentation de KBSOL, nous avons préféré conserver la sémantique du monde réel (structure du modèle conceptuel). Nous avons donc préféré faire une structuration représentative des points de vue des intervenants plutôt qu'une structuration fonctionnelle.

### 4.2.1. CHOIX ET PRESENTATION DE LA PLATE-FORME D'IMPLEMENTATION

En fonction de la plate-forme de développement (matériel et logiciel de développement) disponible au laboratoire, nous avons identifié les contraintes d'utilisation qu'elle engendre (modèle externe).

#### 4.2.1.1 Quelques plates-formes

Il existe plusieurs générateurs de systèmes experts sur le marché et dans le monde de la recherche; certains d'entre eux ont permis de développer les applications en génie civil et en Architecture présentées dans la première partie :

NEXPERT OBJECT,  
SMECI,  
SNARK,  
COGNITIF,  
KOOL  
METACAD [LEININGER, 88],  
Knowledge-Kraft,  
...

#### 4.2.1.2 Arguments du choix

D'après les spécifications d'un système d'informations intégré définies dans le troisième chapitre de la première partie, notre souhait est d'avoir des outils capables:

- d'exécuter des programmes par appel direct et/ou par attachement procédural à des objet,
- de manipuler une importante masse de données,
- de proposer un langage de manipulation des données,
- de représenter des structures partielles de données,
- de gérer la manipulation et la cohérence d'objet à objet et à l'intérieur de l'objet lui-même,
- de proposer une solution, voire plusieurs solutions,
- d'impliquer l'intervenant dans la décision.

En bref, nous souhaitons arriver à un véritable système de traitement de la connaissance.

#### 4.2.1.3 KOOL: un générateur de systèmes experts

*note : les concepts entre quotes sont parfois spécifiques du vocabulaire de KOOL;*

KOOL développé par la société BULL [BULL, 89], est l'un des premiers langages à avoir intégré certaines fonctionnalités des frames à un modèle de classes réflexives.

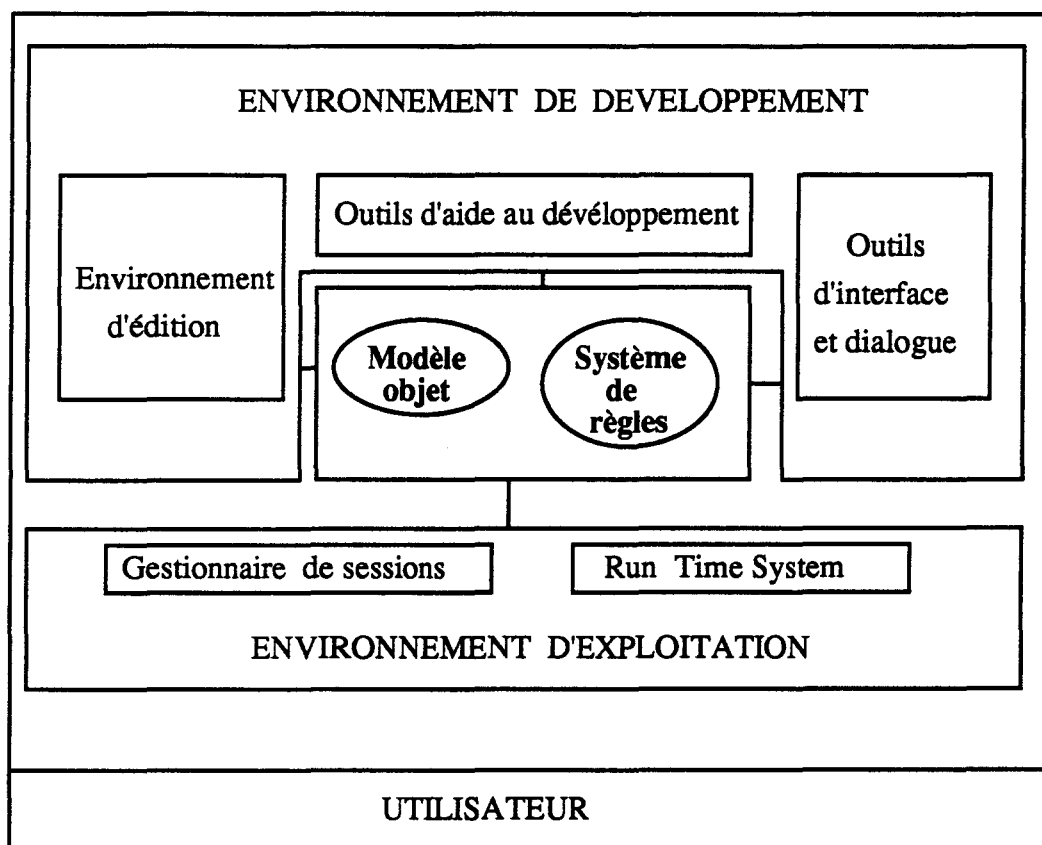
Il permet de modéliser de façon concise un univers complexe (notion de 'classe' et d'"héritage') avec le concept de comportement dynamique ('réflexes' ou 'démons' et 'méthodes').

Les attributs d'instance sont des objets décrits par une classe particulière; ils sont munis de descripteurs qui jouent le même rôle que les facettes d'un attribut ('frame').

Couplé à un système de règles de production ('règles'), Kool est un véritable Générateur de Systèmes Experts (GSE); il offre [fig 48]:

- un environnement de développement (des outils d'interface et de dialogue, des éditeurs structurels et des aides pour le filtrage, le traçage des règles),
- un environnement d'exploitation (gestionnaire de session, création de version exécutable).

De plus, il offre la portabilité des applications.

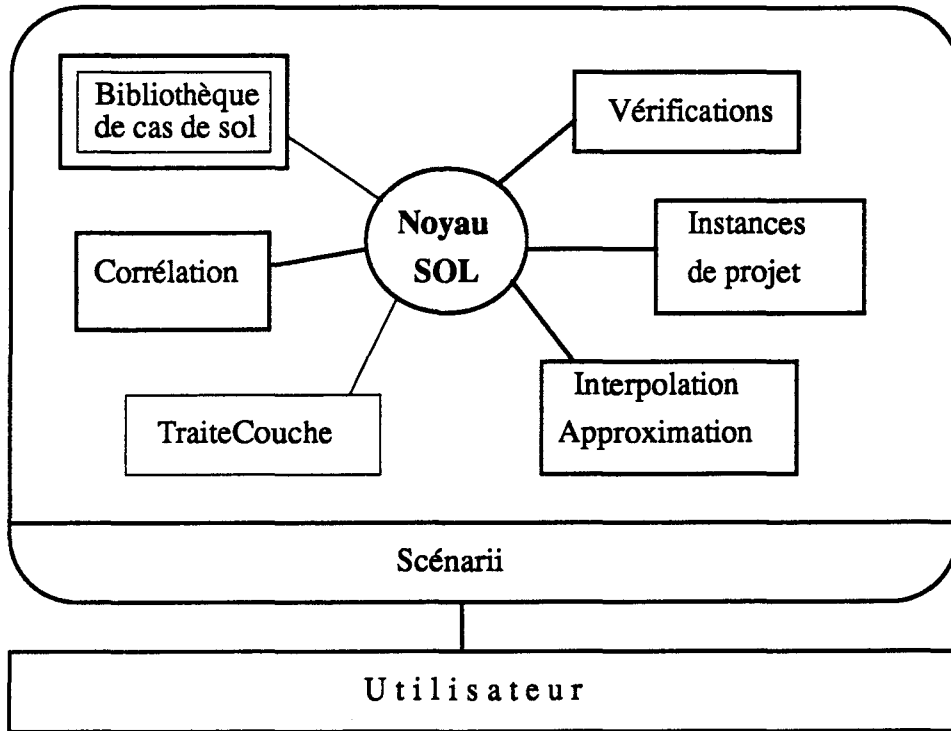


[fig 48]. Les composants de KOOL

La plate-forme KOOL répond aux spécifications et au cahier des charges que nous nous sommes fixés. Elle est implantée au Laboratoire Méthodes et Habitat; nous l'utilisons actuellement dans sa version "micro".

#### 4.2.2 STRUCTURE DU SYSTEME KBSOL

Les langages orientés objet peuvent facilement visualiser les connaissances dans le domaine des infrastructures; ces connaissances sont alors accessibles parce qu'elles sont structurées et décentralisées; elles peuvent aussi bien être utilisées dans les différents traitements qu'être consultées par le concepteur; cette possibilité permet donc de compléter les connaissances ou d'interroger convivialement le système.



[fig 49]. Structure simplifiée de KBSOL

Nous détaillons ci-dessous les différents modules composant la base de connaissances [fig 49]:

**Noyau sol:** structuration objet autour duquel s'articulent tous les modules.

**Bibliothèque de cas de sol:** Ce module peut être consulté indépendamment des traitements; son but est d'aider à la vérification et la validation d'un projet donné; implémenté partiellement.

**Vérifications:** concerne l'analyse de cohérence, c'est à dire toutes les vérifications réalisées par le système; il exploite la bibliothèque des cas de sol, le module d'interpolation et le module de corrélations.

**Instance de projet:** les objets concernant le projet à un instant donné avant leur transfert dans la base de données (chapitre 2).

**TraiteCouche:** Exploite la base d'informations élaborées après l'analyse de cohérence effectué; il permet de finaliser le traitement d'un projet. Il utilise le module d'interpolation-approximation et les corrélations; non implémenté.

**Interpolation-approximation:** module utilisé principalement par TraiteCouche pour déterminer le maillage des limites de couches; implémenté partiellement.

**Corrélations:** module contenant les procédures de corrélation.



**Scénarii:** Autour de ce système existe un module pour aider l'utilisateur dans ses différents traitements.

### 4.2.3 IMPLEMENTATION DES OBJETS

A partir des objets définis lors de l'analyse, on regroupe des entités qui ont une même structure et on identifie ainsi des classes d'objets.

Dans certains cas, les classes sont identifiables immédiatement (par exemple, le regroupement des essais mécaniques de laboratoire dans une même classe).

Dans d'autres cas, l'identification n'est pas immédiate; cela concerne en général des essais assez disparates; par exemple, l'essai au bleu de méthylène et la mesure d'un poids spécifique n'ont pas d'attributs communs; mais afin d'éviter des classes définies par un seul attribut, nous avons regroupé ces deux essais avec d'autres essais dans la même classe 'physique'.

Cette technique évite d'avoir une arborescence trop profonde et un héritage d'attributs inutile.

Ces premières remarques sur l'implémentation concernent uniquement la structure statique (attributs) des objets (classes d'objets); la partie dynamique (les traitements: méthodes, réflexes et règles) aura ses propres classes de résultats.

En fait les traitements ne conditionnent qu'assez peu les objets mais par contre, la construction de la partie statique permet d'identifier partiellement la partie dynamique.

#### 4.2.3.1 Les différentes classes

La traduction sous forme objet relève non seulement d'un savoir technique mais encore du bon sens. Les classes construites à partir du modèle conceptuel sont les suivantes:

Projet	Parcelle	Analyse
Nappe	Terrain	Sondage
Couche	Physique	Boite
Triaxial	ScissometreC	Oedometre
Phicometre	scissometreL	Spt
Penetro-dynamique	Penetro-statique	pressiometre
Essais	In-situ	Laboratoire
Echantillon	piezomètre	Proctor
Cbr	permeametre	granulometrie

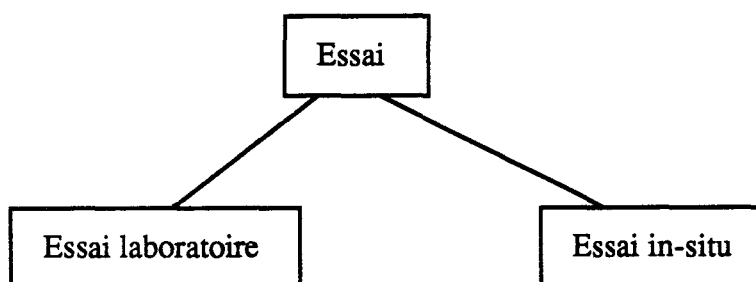
[fig 50]. Les différentes classes

## Le choix d'une stratégie de création de classes.

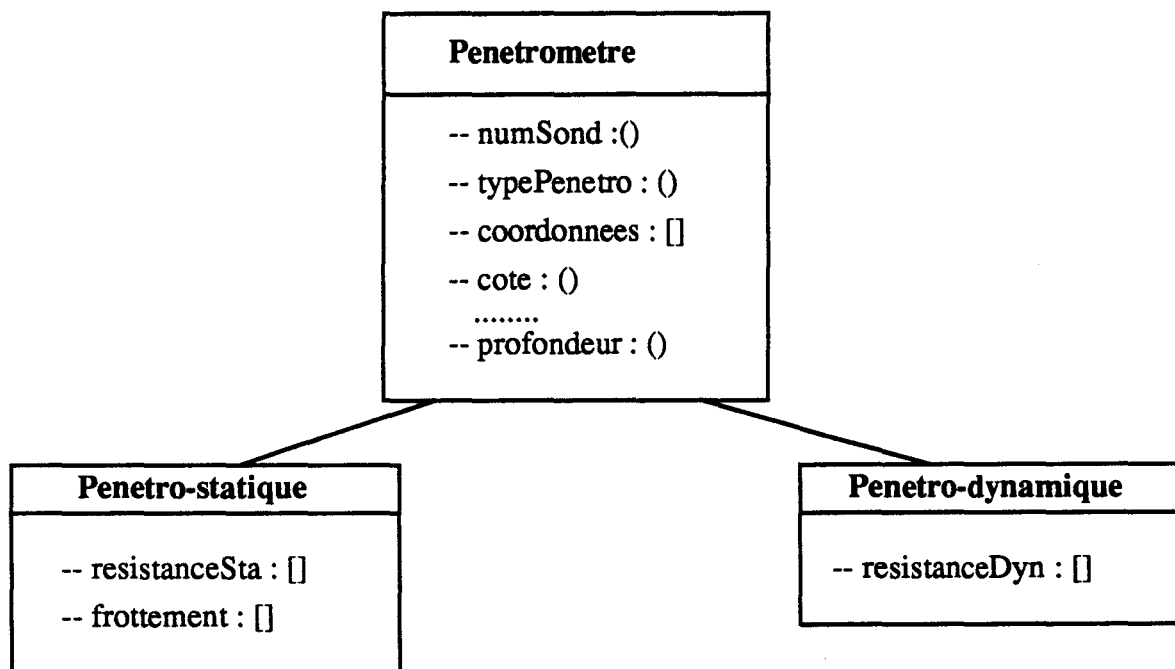
L'identification des liens d'héritage se fait dans le triple souci d'une non redondance d'informations, d'une structuration hiérarchisée de la base de connaissances et d'une modélisation de niveaux de connaissances allant du général au particulier, de l'information clé à l'information facultative.

Nous avons deux types de liens: les liens logiques et les liens fonctionnels (créés pour les besoins).

Nous avons deux moyens principaux pour les identifier: le premier est de partir de la logique de l'utilisateur qui devra se retrouver dans la structure du système, la seconde est de partir des propriétés communes (attributs et méthodes) à plusieurs classes d'objets et de ne les structurer que si cela correspond à une certaine logique dans le monde réel.



Exemple d'identification des liens logiques à partir de la sémantique

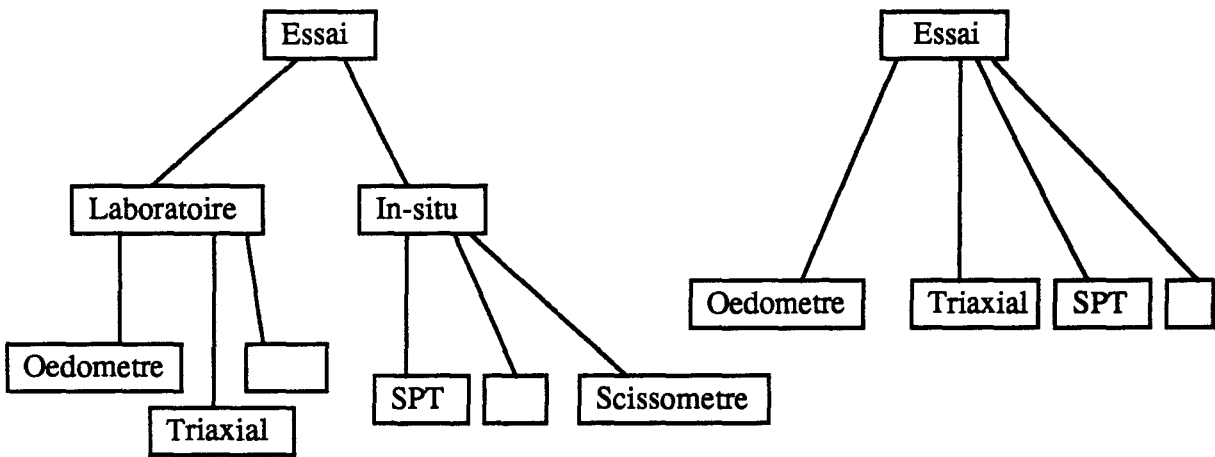


Exemple d'identification des liens logiques à partir des propriétés communes

Pour les liens fonctionnels, nous regroupons des propriétés communes aux classes d'objets avec création, si nécessaire, de classes fonctionnelles (non représentatives du monde réel). Nous reprenons la remarque faite en introduction de 4.2.3 qui met en valeur l'obligation de créer la classe 'physique' dans un but "fonctionnel". La figure 51 montre comment nous avons intégré cette classe dans la structure.

Nous nous sommes rapprochés le plus possible de la logique de l'utilisateur pour respecter la lisibilité et la modularité.

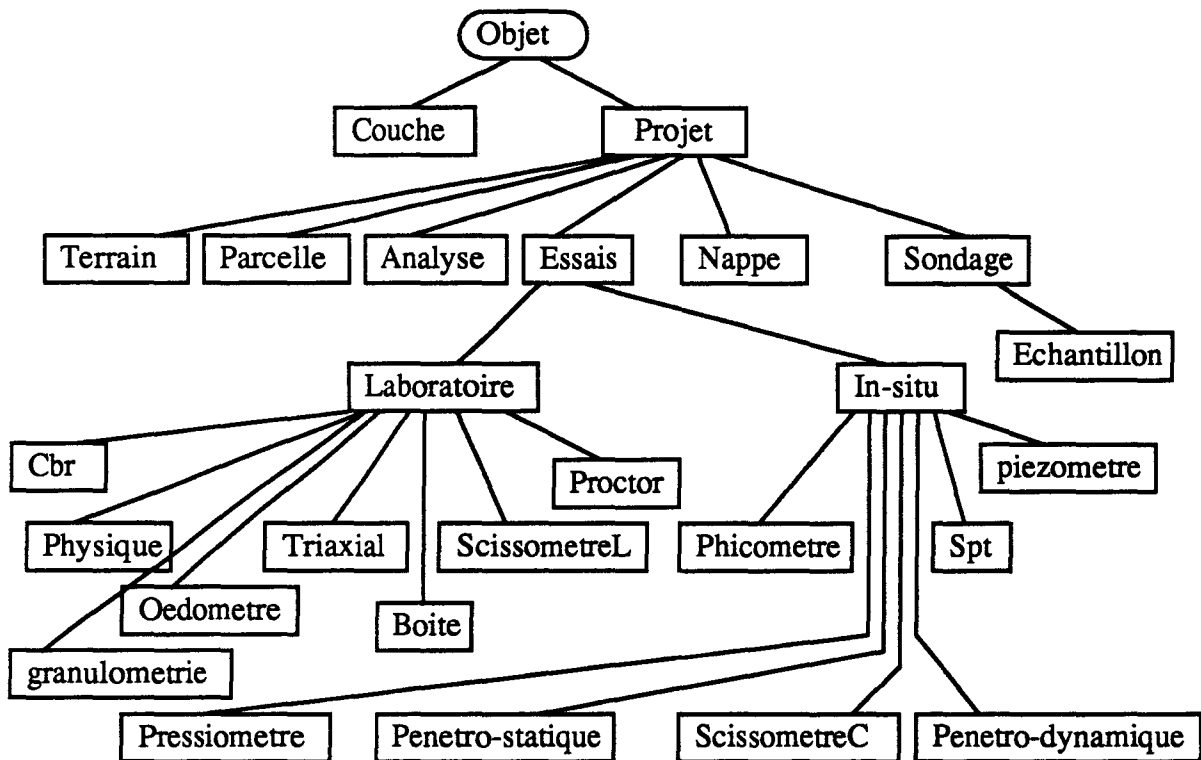
Supposons maintenant que nous voulons regrouper les essais de laboratoire et in-situ dans une même Classe qu'on appellera Essai; ce regroupement, bien qu'il aide à éviter la redondance par factorisation est fait au dépend de la logique de l'utilisateur.



Exemple logique

Exemple de classe fonctionnelle

Nous avons évité autant que possible le recours à des classes fonctionnelles; en effet, dans l'application les objets possèdent en général très peu d'attributs communs; il est alors difficile de les regrouper en classes fonctionnelles; d'autre part ce choix permet d'assurer une correspondance entre les éléments opérationnels et les éléments du modèle conceptuel [fig 23] et [fig 51]; enfin ce choix autorise une bonne gestion de cohérence, une maintenance facile et l'auto-enrichissement du système [BOULEMIA et al, 91]<sup>2</sup>.



[fig 51]. Partie statique

#### 4.2.3.2 La définition des attributs

Nous définissons ici les attributs attachés aux classes d'objets.

En phase de modélisation nous avons défini les domaines d'arrivée des divers attributs.

Pour faciliter la lisibilité, les attributs conservent autant que possible leur dénomination technique, ("Indice des vides" s'appelle indiceVide, "poids volumique du sol" s'appelle pvHumide,...).

Les attributs mémorisent les connaissances demandées aux utilisateurs ou calculées par des procédures (réflexes, méthodes), ou encore déduites à l'aide des règles de production; ces connaissances sont dites assertionnelles.

Pour définir les attributs nous précisons le ou les modes d'acquisition, l'intervalle de validité, les valeurs permises et les tests de cohérence.

Dans Kool, les attributs possèdent des descripteurs:

- mode: mono ou multi-valué,
- type: numérique, intervalle, chaîne de caractères, classe,....,
- attribut demandable ou non,
- libellé de la question à poser,
- la ou les valeurs par défaut,
- les 'réflexes',
- ...

Le recueil et l'analyse des données que nous avons faits durant cette étude, nous permettront d'affecter aux attributs, les descripteurs qui les spécifient le mieux [BOULEMIA et al, 91]<sup>3</sup>.

Un élément sur lequel nous avons porté nos efforts est celui de la mise en place d'une stratégie pour associer un niveau de demandabilité à chaque attribut.

Nous avons défini ici la partie statique du projet; ce qui va suivre concerne la partie dynamique du système (les traitements).

### 4.2.3.3 Un exemple

Dans tout ce qui va suivre dans ce chapitre, nous allons prendre l'exemple de la classe Sondage; nous n'allons pas expliquer ici, en détail les différents descripteurs (type, demandabilité,...).

```
{Class : Sondage
< -- numSond : ()
    Mode : Mono
    Askable : O
    Info : #{permet de donner un numero votre sondage}
    Question : #{donner le numero du * :}
    WhenFilled : [VerifieNum]
-- date : ()
    Mode : Mono
    Question : #{donner la date de realisation de ce sondage :}
-- typeFor : ()
    Mode : Mono
    Info : #{quelle type d'informations vous ont permis de faire des prelevements}
    Question : #{Vous avez realisez un ? :}
    Type : [sondage,fouille,tranchee,puits,autre]
-- nombrOutils : ()
    Mode : Mono
    Type : Number
    Question : #{Combien d'outils avez vous utilise ? :}
-- profondeurs : []
    Mode : Multi
    Type : Number
    Question : #{les profondeurs cumulees atteinte par les outils ? :}
    Whenfilled : [deduitProf]
-- outils : []
    Mode : Multi
    Askable : O
    Question : #{donnez les differents outils utilises }
    Type : [tariere-manuel, benne-preneuse, soupape, carottier, tariere-helicoidale, tube-
        fendu, wagon-drill, marteau-perforateur, echantillonneur-graves-noyees,
        tricone, tariere-continu, carottier-Mazier,...]
-- typeSondage : []
    Mode : Multi
    Type : [carotte,semi-destructif,destructif]
-- coordonnees : []
    Mode : Multi
    Askable : O
    Info : #{les coordonnees xy par rapport au plan de reference de la parcelle}
    Question : #{donnez les coordonnees x,y (m) :}
    Type : Number
```

```

    WhenFilled : [VerifieCoord]
-- profondeur : 0
    Mode : Mono
    Type : Number
-- cotes : []
    Mode : Multi
    Askable : 0
    Info : #{cette partie concerne les differentes cotes d'un sondage dans l'ordre descendant}
    Question : #{donnez les differentes profondeurs cumulees (m) :}
    Type : Number
    WhenFilled : [Calculprof,associerCouche, calculHtCouche,CalculNbreCouches,
ModifieCotes]
-- couches : []
    Mode : Multi
    Type : Couche
-- nombrCouches : 0
    Mode : Mono
    Default : 1
    Type : Number
    Whenfilled : [verifieCouches]
-- substratum : 0
    Mode : Mono
    Askable : 0
    Question : #{Substratum atteint dans ce * ? :}
    Type : [atteint,probable,non-atteint,douteux]
-- acceptSond : []
    Mode : Multi
-- nombrEchan : 0
    Mode : Mono
    Type : Number
    Askable : 0
    Whenfilled : [instancieEchant]
    Question : #{Donnez le nombre d'echantillons preleves dans ce * :}
-- echantillon : []
    Mode : Multi
    Type : Echantillon

```

Methods :

```

donneSondage : DonneSondage
voircouche : VoirCouche
DetruitAt : detruitAt >}

```

#### 4.2.4 IMPLEMENTATIONS DES TRAITEMENTS

Dans la deuxième partie nous avons défini les traitements (numériques et symboliques), les données sur lesquels ils s'appliquent (classe, attributs), et les scénarii.

Ici nous traduisons ces traitements et choisissons le mode de traitement le plus adapté: méthodes, démons ou règles de production.

- les méthodes définissent des actions globales propres à la classe par manipulation de ses attributs. Elles conviennent généralement aux calculs numériques sur les attributs.

- les démons (ou réflexes) définissent des actions locales propres à l'attribut auquel ils sont associés. Ils se déclenchent dès qu'une action est tentée sur cet attribut; l'une de leurs fonctions principales est d'assurer la cohérence des informations.

- les règles de production sont adaptées à la modélisation d'heuristiques et aux vérifications de conditions ( Si <conditions> Alors <conclusion> ).

Elles ne sont ni attachées à une classe, ni à un attribut; elles peuvent diriger les actions sur l'ensemble de la base de connaissances.

Nous allons expliciter ces notions sur des exemples des Classes du projet.

##### 4.2.4.1 Les méthodes

Une méthode est de type déterministe; son domaine d'application et ses arguments doivent être connus; une procédure peut implémenter un ou plusieurs savoirs.

Nous avons utilisé ces méthodes pour la saisie des données stables et pour les calculs déterministes.

Dans notre application les méthodes utilisées sont:

- les méthodes globales qui agissent sur un ou plusieurs objets autres que celui dans lequel, elles sont définies,
- les méthodes ponctuelles qui n'agissent que localement sur l'objet

##### *Exemple de méthode globale*

C'est un exemple de méthode associée à une classe définissant des actions globales propres à la classe par manipulation de ses attributs; par exemple la méthode 'DonneSondage' de la classe projet permet de demander les informations concernant l'instance de l'objet 'Sondage'.

```
(defun DonneSondage (obj)
  (let ((nouvObj (<-- Sondage New)))
    (getValue nouvObj typeFor)
    (getValue nouvObj nombrOutils)
    (getValue nouvObj numSond)
    ...
    (let ((couh (<-- Couche New)))
      (addValue obj nouvObj couches couh)))
    (mapcar 'VoirCouche (getLocal sondag couches)))
```

### *Exemple de méthode ponctuelle*

La méthode ponctuelle associée à une classe définit des actions locales; par exemple, si la réponse à la question 'vous avez réalisé une' est 'fouille', la méthode 'détruitAt' de la classe 'Sondage' permet de désactiver les questions dans ce cas inutiles, telles que les questions sur les attributs 'outils', 'substratum',...

#### **4.2.4.2 Les réflexes**

Dans notre application les réflexes jouent un rôle très important; ils permettent de:

- vérifier l'appartenance des données à leur domaine de validité respectif,
- vérifier leur cohérence par rapport à des données introduites précédemment,
- déduire d'autres valeurs,
- déclencher des traitements particuliers.

Ils sont pratiquement rattachés à tous les attributs.

#### *appartenance au domaine de validité:*

Ce réflexe 'BorneAngleFrottement' se déclenche dès que la valeur saisie pour l'attribut 'angleFrottement' de la classe 'Boite' n'est pas comprise dans l'intervalle 0 et 45°; ce genre de réflexe est attaché à tous les attributs ayant des valeurs numériques (vérification intrinsèque des paramètres).

```
(defun BorneAngleFrottement (obj attribut val)
  (let ((donnee (getLocal1 obj attribut)))
    (cond
      ((or (not (numberp donnee)) (<donnee 0) (> donnee 45 ))
        (displayText '#{|Valeur non cohérente |
                    | l'angle est compris entre 0 et 45 degres|})
         (resetValue1 obj attribut)
         (getValue1 obj attribut))
      (t () ))))
```

#### *vérification de cohérence par rapport à des données introduites précédemment:*

Le réflexe verifieNum associé à l'attribut 'numSond' procède à une vérification quant à l'existence d'un sondage ayant le même numéro.

#### *déduction de valeur :*

Le réflexe 'calculProf' associé au 'cotes' calcule en fonction des cotes de sondages la profondeur totale atteinte par le sondage et instancie la valeur à l'attribut 'profondeur' de la classe 'Sondage'.

#### *déclenchement de traitements:*

Les réflexes associées à la classe 'Physique' permettent de déclencher en cascade les calculs des paramètres physiques. On a aussi associé ce genre de traitement aux essais de laboratoire pour la vérification des valeurs introduites.



### 4.2.4.3 Les Règles

Elaborer une base de connaissances pour un système ne consiste pas à produire des règles sans stratégie préétablie; sans organisation de l'expertise, sans réflexion sur la stratégie d'utilisation des règles, sans ordonnancement des concepts, on n'obtiendra jamais qu'un désordre inopérant. [DELAHAYE, 87], [BONNET et al, 86].

Les règles sont l'interprétation déductive d'une connaissance opératoire représentant un savoir-faire sur le domaine étudié. Elles servent à représenter le raisonnement sur la connaissance; les règles peuvent entretenir des relations entre elles [VEZIN, 90].

L'objectif de ce travail est:

- concrétiser la maquette en démontrant la faisabilité,
- cerner les problèmes techniques liés au système informatique.

### Problèmes rencontrés

Un gros travail de recherche bibliographique nous a permis de rassembler un ensemble de règles textuelles; l'analyse et la traduction de ces règles nous a demandé un temps relativement long pour mettre en pratique ces règles.

Il nous a fallu résoudre par moment des contradictions surtout dans le domaine des corrélations.

### L'utilisation des règles

La production et l'utilisation des règles sur les objets du modèle (classes, attributs,...) nous a donc amené à réfléchir en terme de stratégie. Nous avons relié cette notion aux objectifs suivants:

- rendre cohérent les informations de la base; pour répondre à cette stratégie de cohérence, nous avons écrit des règles de cohérence;
- situer le sol par rapport aux différentes classifications existantes (Atterberg, LCPC, USCS,...) -stratégie de classification- règles de classification; l'exploitation de ces classifications donnent une première appréciation sur le sol (consistant, raide, plastique, pulvérulent,...), ce qui permet de mieux appréhender l'étude de son comportement mécanique;
- rendre intelligent le système par la mise en place de règles de déduction simple utilisant les liens fiables ou dit "de bon sens" entre les connaissances d'un sol -stratégie de bon sens- règles de bon sens;
- gérer tous les processus de déductions (les règles évoquées aux trois premiers objectifs) et leurs conclusions, pour extraire la connaissance la plus complète possible du sol étudié -stratégie de synthèse- règles de synthèse.

### *Exemples de règles de cohérence*

Reprenons l'exemple cité au paragraphe 3.2.2 de la partie 2 et développons certaines règles de cohérence qui sont réalisées sur cette combinaison : "Sondage-Couche-Boite"

L'objet Sondage permet selon le type d'outil de déterminer le type de sondage.

```

IF *Sondage:outils in [tricone, marteau-perforateur, ...]
THEN *Sondage^typeSondage = Destructif
IF *Couche^nature = argile
IF *Couche^caracSol = molle
THEN *Sond:outils in [tariere-main, autoforeur]

```

### *Exemples de règles de classification*

A partir de la classification du LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussée), nous mettons en valeur les règles décisionnelles qui permettent la navigation dans les différentes branches; en elle même, cette présentation se prête bien à une analyse arborescente.

La classification des sols représente des réalités qui pourrait se produire.

```

IF *Couche^parameter^%sup80 Lt 50
  *Couche^parameter^%sup2 Lt 50
THEN *Couche^nom = sable
IF *Couche^nom = sable
  *Couche^parameter^%inf80 Lt 5
THEN appreciation = (<-- analysgranul)
IF appreciation = mal gradue
THEN *Couche^nom = sable-mal-gradue

```

Le module "analysgranul" conclue sur le caractère mal ou bien gradué d'un sol en fonction des données de la granulométrie.

### *Exemples de règles de bon sens*

Ces quelques règles illustrent ce que nous appelons le "bon sens":

```

IF *Couche^nature in [argile, marnes, argile-sableuse,...]
THEN *Couche^typeSol = pulverulent

```

### *Exemple de règles de calcul*

Les règles peuvent aussi procéder au calcul de paramètre numérique; elles servent aussi à déduire à partir de valeur numérique une valeur symbolique.

```

IF *Couche^parametre^indiceP in [5..15]
THEN Couche^parametre^caracDomine <-- limoneux
IF *Couche^parametre^densiteR Gt 50
THEN *Couche^caracSol <-- lache
IF *Oedometre^preconsolid Gt *Oedometre^contrainteTerre
THEN *Oedometre^etatConsol <-- consolide

```

### *règles de synthèse*

A partir de règles simples, il faut définir des stratégies d'utilisation et mettre en place des réseaux d'inférence; ces réseaux mis en place répondent bien à un problème de classification.

#### 4.2.4.4 Les différentes instances

Elles concernent le projet et les cas de sol; nous verrons des exemples d'instances de projet au premier chapitre de la troisième partie.

### 4.3 CONCLUSION

Le modèle de coopération nous a permis de recenser tous les utilisateurs et les scénarii qui leur sont associés.

Sa mise en place nécessite une structure particulière de la base de connaissances afin d'être utiliser le plus efficacement possible par les traitements de chacun des scénarii.

L'outil d'implémentation est le générateur de systèmes experts Kool; le langage à objets de Kool nous a permis d'implémenter le modèle des données, une partie du modèle des traitements avec les démons et les méthodes; la composante Système expert de Kool permet d'implémenter les traitements de type règle de production.

Les règles mises en oeuvre sont le produit d'une recherche bibliographique; nous avons deux types de savoir et de savoir-faire: quantitatif (cohésion, poids, pression,...) et qualitatif (adapté, molle, lâche,...).

Les règles sur les corrélations sont incertaines et parfois contradictoires.

Une expertise auprès des spécialistes sera très fructueuse pour notre maquette puisque elle permettra d'une part de valider le savoir-faire et d'autre part enrichir la base de connaissances.

L'héritage simple de Kool s'est avérée suffisant pour notre application.

Kool nous a permis de concrétiser la maquette du système Kbsol sur laquelle nous nous appuierons pour envisager des perspectives d'améliorations et des limites; notamment:

- compléter les objets manquants,
- les traitements et surtout le développement du module 'Traite-couche',
- des expertises pour rendre la base consistante.

---

## CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Dans cette partie, nous avons répondu aux questions suivantes : comment analyser? (méthodologie), comment concevoir?, quelles données?, quel type de traitement? (modélisation), sur quelles données?, dans quel objectif?, pour quel ouvrage? (coopération) et sur quelle plate-forme ? (implémentation).

Nos réponses concernent toutes les données, tous les traitements associés aux différentes entités et à leurs paramètres, les traitements associés aux relations entre les objets et aux relations entre les attributs.

KADS a permis de structurer ces données et ces traitements.

Les données sont représentées selon le formalisme orienté objet bien adapté à la vision des entités du monde réel du concepteur.

La phase de traitement est structurée par niveau; elle part de la vérification des valeurs associées à un attribut d'objet et est active jusqu'à ce que la fiabilité du système ainsi réalisé soit établie.

Il y a donc progression par étapes des données imprécises aux données précises.

En fonction des données et des traitements qu'on veut réaliser, le modèle de coopération décrit l'interaction entre le système et les utilisateurs; une fonction importante du système est en effet sa capacité à pouvoir dialoguer avec l'utilisateur; cette interactivité se fait par divers scénarii d'utilisation associés aux différentes techniques et par des procédures de validation guidée par l'utilisateur.

A travers la maquette de faisabilité nous avons validé les modèles (modèles des données, des traitements et de coopération).

L'implémentation résultante nous permet de montrer l'intérêt et la faisabilité de la maquette du système KBSOL et de relever les limites du modèle et les perspectives d'amélioration.

Le recueil des connaissances constitue le principal problème de la mise en oeuvre des systèmes à base de connaissances.

Les connaissances présentes dans KBSOL sont issues d'une expertise d'"école". Pour l'enrichir, il serait souhaitable de mener une expertise auprès des experts du domaine.

Une amélioration serait possible en recensant les cas de sol connus sur la région par exemple.

La modélisation du raisonnement - règles, stratégie,...- s'est avérée plus difficile que l'implémentation du modèle conceptuel -objets, relations-; cependant, la modélisation du raisonnement est plus facile à partir de règles qu' à partir d'algorithmes classiques; ceci est encore plus vrai lorsque nous avons une stratégie de mise en oeuvre.

La maquette du système ainsi réalisé est capable de donner des informations sur les connaissances mises en oeuvre bien qu'il ne soit pas encore capable d'expliquer son raisonnement.

---

## **PARTIE III**

### **UTILISATION DE LA BASE DE CONNAISSANCES KBSOL**

## **INTRODUCTION**

Après avoir présenté la modélisation et l'implémentation de la base de connaissances sur le sol multiutilisateurs et multitechniques, nous consacrons cette troisième partie à l'utilisation de la maquette KBSOL.

Dans le premier chapitre nous présentons un exemple d'utilisation de la maquette de KBSOL. L'objectif de cette présentation est de montrer la faisabilité de la maquette et les perspectives de son développement.

Dans le deuxième chapitre nous introduisons les notions de couplage de KBSOL à un logiciel d'évaluations technico-économiques des fondations (EVALFOND) , d'intégration à un module technique relatif aux projets de terrassement (CASOL) et finalement, le couplage à une base de données (BDSOL).

Ces premiers travaux de couplage et d'intégration entre KBSOL et d'autres traitements ouvre des perspectives importantes sur l'utilisation de notre étude et la justification de la notion de système d'informations intégré.

---

## CHAPITRE 1 : EXEMPLE D'APPLICATION

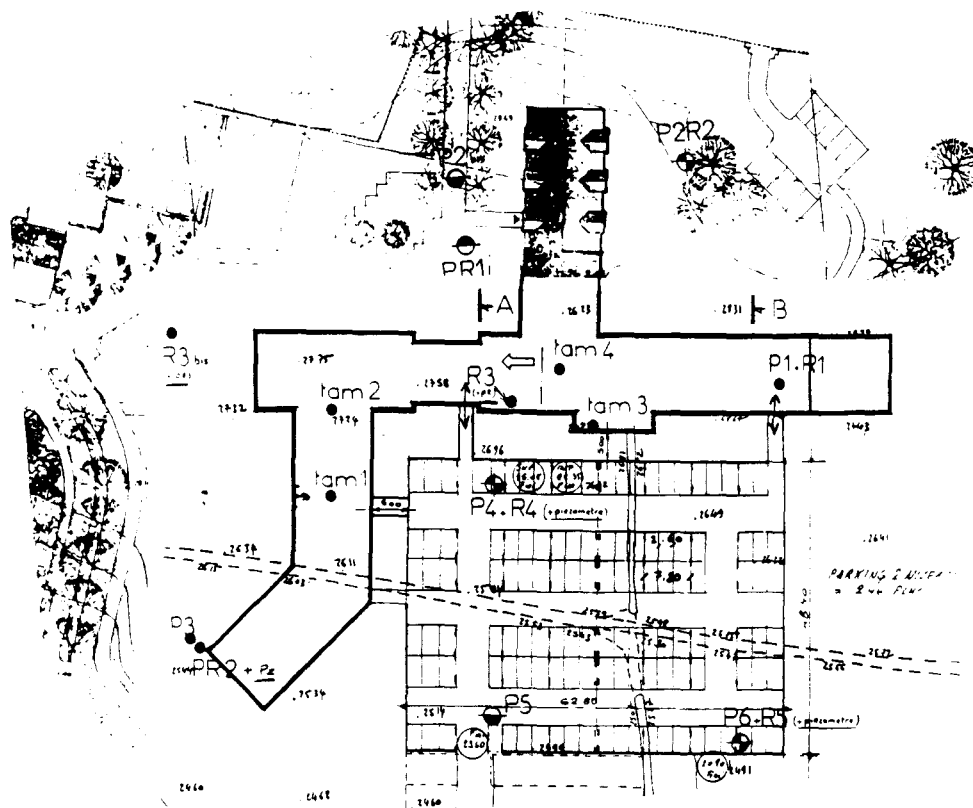
### 1.0 PRESENTATION

Le but de ce chapitre est d'analyser sur un exemple quelques fonctionnalités de la maquette KBSOL; nous verrons ainsi, la présentation de l'exemple, la saisie d'un projet et l'analyse de cohérence.

### 1.1 PRESENTATION DU PROJET EXEMPLE

L'exemple qui sert à la démonstration du fonctionnement est un projet de construction des bureaux du futur siège social d'une entreprise. L'immeuble est composé de trois ailes articulées autour d'un noyau central d'accueil.

Les emplacements de reconnaissance (essais au pénétromètre, sondages de reconnaissance géologique et sondages pressiométriques) sont repérés sur le plan [fig 52].



[fig 52]. Plan de sondage

Pi: représente les essais pénétrométriques,  
 PRi: représente les essais pressiométriques,  
 RiPi: représente des essais de reconnaissance géologique en étalonnage  
 Ri et TAMi: représente les sondages courts.

Nous avons sur cet exemple:

- 19 sondages avec ou sans pose de piézomètre,
- un ensemble d'essais de laboratoire dont:
  - 2 essais oedométriques,
  - des essais d'identifications,
- 5 essais pressiométriques,
- 9 essais pénétrométriques.

## 1.2 SAISIE DU PROJET

La première action consiste à saisir les éléments du projet; le système propose à partir du menu principal plusieurs options suivant le problème à traiter.

Nous n'allons pas présenter toute la saisie; mais au fur et à mesure, nous montrons certains exemples clés de l'application.

Nous voyons ci après le contenu de l'instance 'Projet\_1' [fig 53] de la classe Projet qui contient les informations générales sur le projet.

```
{Projet : Projet_1
-- nom : construction-bureaux
-- date_traitement : 22-07-92
-- date : 21-01-92
-- but : construction
-- stade : ()
-- environ : urbain
-- auteur : ()
-- maitreOeuvre : ()
-- lieu : Lille
-- parcelle : [Parcelle_2]
-- nappe : Nappe_3
-- analyse : Analyse_4
-- terrain : Terrain_5
-- nombre-sondage : 19
-- sondage : [Sondage_6,Sondage_7,Sondage_8,Sondage_9,Sondage_10,Sondage_11,
             Sondage_12,...]
-- essaiLabo : [oedometre,identification]
-- essaiInsitu : [pressio,penetro-statique]
-- nombrSitu : 14
-- nombrLabo : 2
-- nombrEssais : 16
-- nombrEchant : 6
-- limite : 4 }
```

[fig 53]. Objet Projet instancié

Une fois l'instanciation de l'objet Projet réalisée, on peut commencer à saisir soit les informations sur les sondages, soit les informations sur les essais; pour cet exemple, nous commençons par la saisie des sondages.



L'étape préliminaire à la saisie des données du sondage est la création des instances sondages; puis par une série de question du système à l'utilisateur, les attributs des instances de sondages sont remplis en fonction des informations disponibles.

Nous voyons ci après un exemple d'instanciation de l'objet Sondage [fig 54]:

```
{Sondage : Sondage_6
1 -- numSond : spr 1
2 -- date : ()
3 -- typeFor : sondage
4 -- nombrOutils : 2
5 -- profondeurs : [7,20]
6 -- outils : [tariere-helicoidale,tricone]
7 -- typeSondage : []
8 -- coordonnees : [59.68,110.13]
9 -- profondeur : ()
10 -- cotes : [28.75,28.35,27.85,27.25,25.85,22.75,20.85,20.65,20.05,19.95,8.75]
11 -- couches : []
12 -- nombrCouches : ()
13 -- acceptSond : []
14 -- substratum : non-atteint
15 -- nombrEchan :()
16 -- echantillon : [] }
```

[fig 54]. Objet Sondage instancié

- 1: numéro du sondage, introduit par l'utilisateur
- 2: date de la réalisation du sondage
- 3: choisi parmi un ensemble de moyens proposés [Sondage, puits, tranchées, Autre] **[Démon]**
- 4: introduit par l'utilisateur, (nombre d'outils utilisés dans ce sondage)
- 5: introduit par l'utilisateur (profondeur respective atteinte par les outils) **[Démon]**
- 6: choisi par l'utilisateur parmi un ensemble d'outils [tarière-main, tricône, wagon-drill,...]
- 7: déduit par le système en fonction des outils utilisés parmi un ensemble [destructif, semi-destructif, carotte]
- 8: introduit par l'utilisateur (coordonnées du sondage; vérifiées par le système quant à l'appartenance à la parcelle **[Démon]**)
- 9: déduit par le système (profondeur atteinte par le sondage par rapport au terrain naturel)
- 10: introduit par l'utilisateur sous forme de profondeur cumulée; le système les traduit sous forme de cotes. **[démon]**
- 11, 12: en fonction des cotes saisies, le système calcule le nombre de couches et les instancie
- 13: sera déduit ultérieurement par le système après instanciation des attributs de couches.
- 14: choisi par l'utilisateur parmi un ensemble [atteint, douteux, non-atteint]
- 15: introduit par l'utilisateur (nombre d'échantillons pris dans le sondage pour les essais de laboratoire) **[démon]**; ce démon permet d'instancier les échantillons.
- 16: aucun échantillon n'a été pris dans cette couche.

La saisie des résultats d'un sondage conduit à la création d'instances de couches correspondant aux couches qu'il traverse (ici 'Couche\_26' à 'Couche\_35').

```

{Couche : Couche_35

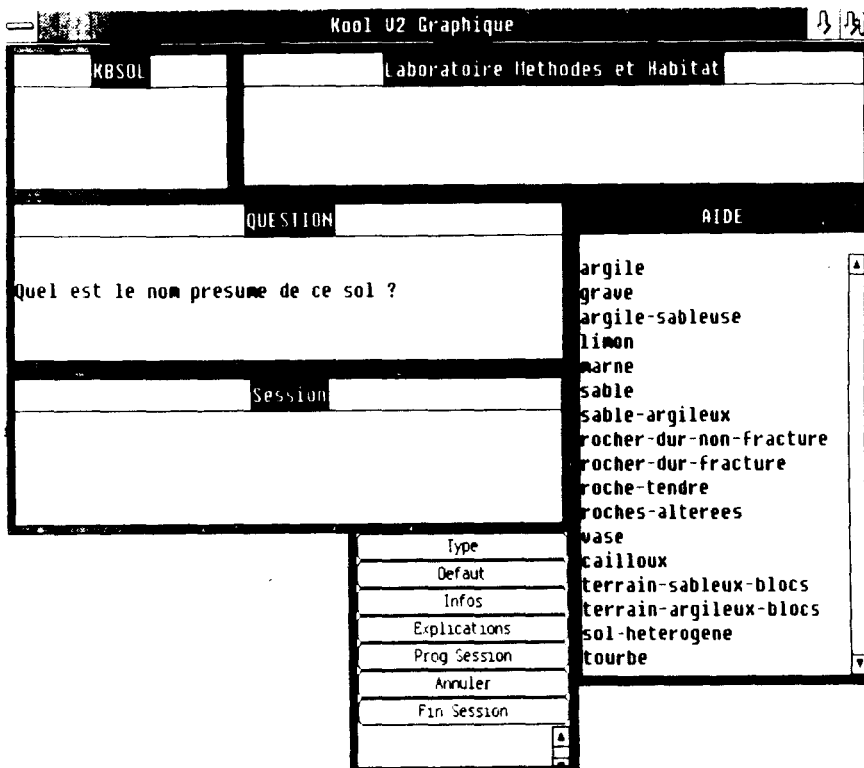
1 -- nature : sable
2 -- hauteurCouche : 11.20
3 -- numEchant : []
4 -- parametrePhysique : Physique_44
5 -- typesol : pulverulent
6 -- caracSol : moyen-compacte
7 -- couleur : vert
8 -- classif : inconnue }

```

[fig 55]. Objet couche instancié

- 1: choisi par l'utilisateur parmi [argile, sable, limon, graviers, marne,... Autre] [**démon**] ce démon permet de rajouter d'autres natures de sol dès que l'utilisateur choisi l'option Autre; à ce stade, le système rajoute la nouvelle nature de sol.
- 2: déduit par le système en fonction des cotes du sondage
- 3: l'attribut n'est pas instancié puisque nous n'avons pas prélevé d'échantillon dans cette couche
- 4: les paramètres physiques associés à cette couche (de type classe)
- 5: proposé par l'utilisateur ou déduit par le système parmi un ensemble [pulvérulent, compacté, cohérent]
- Si la nature du sol est sable  
Alors le type de sol est pulvérulent.
- Si la nature du sol est incluse dans [argile, argile-sableuse, marne,...]  
Alors le type de sol est cohérent.
- 6: proposé par l'utilisateur ou déduit par le système parmi un ensemble [raide, dense, lâche,...]
- Si la teneur en eau est proche de la limite de plasticité  
Alors la caractéristique du sol est raide.
- 7: choisi par l'utilisateur parmi un ensemble de couleurs proposé [marron, beige, kaki,..., Autre]
- 8: choisi par un ensemble de classification [uscs, rtr, lcpc,inconnue, Autre] [**Démon**]; ce démon permet de rajouter d'autres couleurs dans la base.

A travers l'exemple de la saisie de la couche, 'Couche\_35', [fig 55] qui est la dernière couche de ce sondage, nous illustrons l'aide graphique [fig 56] apportée par le système à l'utilisateur.



[fig 56]. Aides graphiques

Cette figure met en évidence les aides proposées à l'utilisateur qui sont:

- une liste de sols connus par le système qui pourraient correspondre aux sols étudiés,
- un ensemble d'informations complémentaires disponibles suivant l'information à saisir; dans le cas du graphe, seules les options Type, Infos, Annuler et FinSession sont activables:
  - *Type*: correspond au type de la valeur demandée (ici : chaîne de caractère),
  - *Infos*: informe l'utilisateur sur la nécessité de la donnée à saisir,
  - *Annuler*: permet d'annuler la commande en cours,
  - *FinSession*: correspond à l'arrêt de la session en cours.

Cette saisie se répète pour tous les sondages et toutes les couches contenues dans le projet; sur l'objet 'Sondage\_6' nous n'avons pas d'objet échantillon; il sera présenté plus tard dans le paragraphe 1.3.5.

### 1.3 ANALYSE DE COHERENCE

La phase de saisie des sondages terminée, nous pourrons commencer la phase de saisie des essais; cette saisie est réalisée interactivement avec une analyse de cohérence.

#### 1.3.1 Cohérence de l'essai préssiométrique

Nous présentons l'exemple de la saisie de l'essai préssiométrique 'pressiomètre\_31' [fig 57] et les traitements de cohérence associés.

```
{pressiometre : pressiometre_31
1 -- numSond : spr1
2 -- numPres : pr1
3 -- date : ()
4 -- typePressio : Menard
5 -- typeSonde : gaine-souple
6 -- diametreSonde : 60
7 -- coordonnees : []
8 -- cote : ()
9 -- coteDepart : 0.9
10 -- profondeur : ()
11 -- intervalle : [2,3]
12 -- profInterval : [9,20]
13 -- modulePressio : [2.1,5.5,6.4,7.6,9,11.6,21,11.5,7.5,16,10.5,8.5,11.4,9,12,15.5]
14 -- pressionLimite : [0.44,0.55,0.56,0.67,0.88,0.99,1.6,1.28,1.06,1.51,1.21,1.2,1.4,1.12,1.4,1.6]
15 -- contraintePO : [] (Mpa)
16 -- pressionFluage : [0.25,0.32,0.34,0.46,0.59,0.63,1.17,0.85,0.67,1.02,0.71,0.79,0.9,0.64,0.87,1.04]
17 -- confEssai : 100
18 -- acceptEss : []
19 -- pl-po : []
20 -- precisModule : []
21 -- precisLimite : []
22 -- precisFluage : []
23 -- precisPO : []
24 -- precisPl-p0 : []
25 -- substratum : ()
26 -- couches : []
27 -- profCorresp : []
28 -- nombrcouches : () }
```

[fig 57]. Objet Pressiomètre instancié avant contrôle de cohérence

1: donné par l'utilisateur; à partir de cet attribut, on vérifie l'existence du sondage et on instancie les attributs 7,8,10,25,26 et 28 [**Démon**]

Ce démon associé à l'attribut numéro de sondage (numSond) consiste à vérifier l'existence du sondage;

Si le sondage existe Alors le système instancie les attributs de pressiomètre sus cités

Sinon le système demande à l'utilisateur s'il veut créer ce sondage; sinon redemander un autre numéro de sondage.

2: introduit par l'utilisateur (numéro associé à l'essai préssiométrique)

3: introduit par l'utilisateur (date de réalisation)

4: choisi par l'utilisateur parmi un ensemble de pressiomètre [Menard, Standard,... Autre]

5: choisi par l'utilisateur parmi un ensemble [gaine-souple,...Autre]

6: introduit par l'utilisateur (diamètre de la sonde)

Les informations 4,5 et 6 sont utiles, pour la vérification par corrélation par rapport à d'autres essais [3.2.5 de la deuxième partie].

9: introduit par l'utilisateur, on vérifie que coteDepart est inférieure à la cote NGF [**Démon**]

Ce démon vérifie la condition suivante: la cote de début de l'essai doit être toujours inférieure à la cote du Terrain Naturel. (principe de vérification présenté au paragraphe 3.2.1)

11: choisi par l'utilisateur parmi un ensemble [1 --> valeur tout les 0.50 m.,

2 --> tout les 1 mètre,

3 --> tout les 1.5 m.

12: introduit par l'utilisateur (profondeur atteinte du premier jusqu'au dernier intervalle)

En fonction de l'intervalle de mesure, ce démon demande l'avant dernière profondeur atteinte.

13, 14,16: données par l'utilisateur (module pressiométrique, pression limite et pression de fluage);

la première vérification se fait de manière intrinsèque:  $0.2 < E < 20000 \text{ Mpa}$   
 $0.02 < pl < 50 \text{ Mpa}$

cette première vérification est faite par un démon attaché à chaque attribut.

la deuxième vérification faite par le système implique les rapports  $E/pl$  et  $pl/pf$  (3.2.6 de la deuxième partie); cette vérification inclue cette fois la nature du sol et permet de donner une constatation à l'utilisateur:

Si  $5 < E/pl < 8$ , Alors terrain alluvionnaire.

Si  $12 < E/pl < 30$ , Alors le sol est surconsolidé.

15: introduit par l'utilisateur ou déduit par le système;

Cette déduction sera faite avec précision si on connaît le poids volumique de la succession des couches ainsi que la position de la nappe phréatique; dans le cas contraire, connaissant la position de la nappe phréatique on propose un calcul approché de cette pression.

$$P_0 = K_0 (\gamma H_s - \gamma' H_i) + \gamma_w H_i \quad \text{avec } H_i = H - H_s$$

H: la profondeur par rapport au terrain naturel,

Hs: la profondeur de la nappe

Hi: hauteur du terrain immergé

17: introduit par l'utilisateur; elle peut être remise en cause par le système selon les règles citées en [3.2.8 de la deuxième partie].

18: déduit par le système en fonction des couches et du sondage (**règles de production**); cette déduction sera faites par couche et prendra une valeur parmi [adapté, interdit, toléré] (paragraphe 3.2.2 du chapitre 3 de cette partie);

nous donnons quelques règles qui ont permi de donner cette appréciation:

Si la nature du sol est sable

Si la caractéristique du sol est lâche

Si le sable est sous la nappe

Alors le sondage est interdit

Si la nature du sol est sable  
 Si la caractéristique du sol est lâche  
 Si le sable est au dessus de la nappe  
 Alors le sondage est toléré

Si la nature du sol est sable  
 Si la caractéristique du sol est compacte  
 Alors le sondage est adapté

Si la nature du sol est argile  
 Si la caractéristique du sol est molle  
 Alors le sondage est interdit

Si la nature du sol est argile  
 Si la caractéristique du sol est incluse dans [moyen-compactes, compactes]  
 Alors le sondage est adapté

Si le sondage est adapté  
 Si la nature du sol est adapté à l'essai  
 Alors l'essai est accepté (adapté)

19: calculé par le système, un **démon** attaché à p0 se déclenche pour instancier pl-p0.

20,21,22: déduit par le système en fonction de l'attribut 'acceptEss';

23: déduite par la suite; attribut multivalué instancie la valeur de confiance à l'ensemble des couches (échelle 0 à 100); l'attribut est instancié entre 0 et 1.

24: calculé par le système

27: calculées par le système (profondeurs correspondantes aux caractéristiques mécaniques).

Le déclenchement de ces vérifications et des déductions sur les objets et les attributs se fait par affichage:

des messages d'avertissement lorsqu'une incohérence sur les données introduites a été détectée (grâce aux démons notamment), d'informations complémentaires sur le sol étudié grâce à l'activation des règles.

Une fois l'essai 'pressiomètre\_31' instancié, le système procède après vérifications sur les couches, calculs et déductions (**règles de production et démons, algorithmes**), au remplissage des attribut de l'objets 'pressiometre\_31' et l'objet 'Sondage\_6'.

Ainsi, l'instance de pressiomètre 'pressiometre\_31' sera la suivante [fig 58]:

```
{pressiometre : pressiometre_31
1 -- numSond : spr1
2 -- numPres : pr1
3 -- date : ()
4 -- typePressio : Menard
5 -- typeSonde : gaine-souple
6 -- diametreSonde : 60
7 -- coordonnees : [59.68,110.13]
8 -- cote : 28.75
9 -- coteDepart : 0.9
10 -- profondeur : 20
11 -- intervalle : [2,3]
12 -- profInterval : [19.85,19.40]
13 -- modulePressio : [2.1,5.5,6.4,7.6,9,11.6,21,11.5,7.5,16,10.5,8.5,11.4,9,12,15.5]
14 -- pressionLimite : [0.44,0.55,0.56,0.67,0.88,0.99,1.6,1.28,1.06,1.51,1.21,1.2,1.4,1.12,1.4,1.6]
15 -- contraintePO : [0.008,0.018,0.028,0.038,0.048,0.058,0.067,0.076,0.078,0.086,0.099,0.112,
0.125,0.138,0.151,0.164]
16 -- pressionFluage : [0.25,0.32,0.34,0.46,0.59,0.63,1.17,0.85,0.67,1.02,0.71,0.79,0.9,0.64,0.87,1.04]
17 -- confEssai : 100
18 -- acceptEss : [Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte]
19 -- pl-po : [0.437,0.532,0.532,0.632,0.832,0.932,1.533,1.204,0.982,1.424,1.111,1.062,1.275,
0.982,1.249,1.436]
20 -- precisModule : [0.1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
21 -- precisLimite : [0.1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
22 -- precisFluage : [0.1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
23 -- precisPO : [1,1,1,1,1,1,1,1,1]
24 -- precisPl-p0 : [0.55,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
25 -- substratum : non-atteint
26 -- couches : [Couche_26,Couche_27,Couche_28,Couche_29,Couche_30,
Couche_31,Couche_32,Couche_33,Couche_34,Couche_35]
27 -- profCorresp : [27.85,26.85,25.85,24.85,23.85,22.85,21.85,20.85,19.85,18.35,16.85,15.35,
13.85,12.35,10.85,9.35]
28 -- nombrcouches : 10 }
```

[fig 58]. Objet Pressiomètre instancié après contrôle de cohérence

- 1: à partir de cette donnée, le système vérifie son existence et instancie les attributs 7, 8, 10, 25, 26 et 28.
- 12: changement des valeurs de profondeurs en cotes correspondantes (vérification par rapport à la profondeur du sondage).
- 15: connaissant les poids volumiques, le système détermine la pression des terres P0.
- 17: la confiance accordée à l'essai reste inchangée puisque cette confiance est lié au sondage et l'utilisateur n'a pas modifié cette valeur de confiance.
- 18: l'essai est adapté pour toutes les couches
- 19: calculées par le système.
- 20,21,22: instanciés par le système; pour une commodité d'utilisation la valeur 1 correspond à 100%.
- 23: cette valeur a été instancié en fonction des poids volumiques des différentes couches.

24: la confiance accordée à p1-p0 est déterminé en associant les précisions de p1 et p0 et que l'on divise par deux; Comme nous avons dix couches nous aurons dix attributs de qualité pour P0, par contre nous aurons seize valeurs de précision associée à p1-p0 étant donnée que nous avons seize valeur de p1.

27: calcul des profondeurs correspondantes aux pressions.

Après analyse de cohérence et correspondance avec l'essai réalisé dans ce sondage, on instancie les attributs [fig 59].

```
{Sondage : Sondage_6
1 -- numSond : spr1
2 -- date : ()
3 -- typeFor : sondage
4 -- nombrOutils : 2
5 -- profondeurs : [7,20]
6 -- outils : [tariere-helicoidale,tricone]
7 -- typeSondage : [Semi-destructif,Destructif]
8 -- coordonnees : [59.68,110.13]
9 -- profondeur : 20
10 -- cotes : [28.75,28.35,27.85,27.25,25.85,22.75,20.85,20.65,20.05,19.95,8.75]
11 -- couches : [Couche_26,Couche_27,Couche_28,Couche_29,Couche_30,
                Couche_31,Couche_32,Couche_33,Couche_34,Couche_35]
12 -- nombrCouches : 10
13 -- acceptSond : [Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Tolere]
14 -- substratum : non-atteint
15 -- nombrEchan : ()
16 -- echantillon : [] }
```

[fig 59]. Objet Sondage instancié après contrôle de cohérence

7: en fonction des outils utilisés dans ce sondage, le système déduit le type de sondage destructif, semi-destructif ou carotté (**règles de production**):

Si l'outil est tarière-helicoidale Alors le type de sondage (typeSond ) est semi-destructif  
Si l'outil est tricône Alors le type de sondage (typeSond ) est destructif

9: déduite par le système en fonction des cotes du sondage

11,12: en fonction des cotes, le système calcule le nombre de couches et les instancie.

13: en tenant compte de la nature des couches dans ce sondage, le système déduit si, l'outil utilisé est adapté, toléré ou interdit.



### 1.3.2 Cohérence de l'essai pénétrométrique

L'essai pénétrométrique instancié a été réalisé près du sondage r2p2; ce sondage a été réalisé en étalonnage de cet essai pénétrométrique.

```
{penetro-statique : penetro-statique_36
1 -- numSond : r2p2
2 -- numPenS : p2bis
3 -- date : ()
4 -- typePenetro : Meurisse
5 -- typeStDyn : Oui
6 -- diametre : ()
7 -- perimetreTube : 13.8
8 -- cone : mobile
9 -- vitesse : ()
10 -- coordonnees : [81.9,122.5]
11 -- cote : 29.2
12 -- profondeur : 9.5
13 -- intervalle : [1]
14 -- profInterval : [9.5]
15 -- resistanceSta : [900,800,1500,1800,1900,2000,2100,1950,2300,2500,2310,3500,
                    5000,5200,7000,5600,6300,9000,20000] (Kpa)
16 -- frottement : [0,1.5,2.5,4,6,9,11.25,14.5,15,20,24.5,29.3,32.5,40,45,47.5,50,53,58] (KN)
17 -- confEssai : 100
18 -- precisResistS : [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
19 -- precisFrot : [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
20 -- profCorresp : [28.7,28.2,27.7,27.2,26.7,26.2,25.7,25.2,24.7,24.2,23.7,23.2,22.7,22.2,21.7,21.2,
                    20.7,20.2,19.7]
21 -- substratum : non-atteint }
```

[fig 60]. Objet Penetrometre instancié

- 1: introduit par l'utilisateur (numéro du sondage en étalonnage)
- 2: introduit par l'utilisateur (numéro de l'essai réalisé)
- 3: date de réalisation de cet essai
- 4: choisi parmi un ensemble [Meurisse, Gouda,Sattec, Fondasol, Andina, Autre]
- 5: choisi par l'utilisateur parmi [Oui / Non];  
Oui correspond au pénétromètre statique-dynamique
- 6, 7, 8, 9: introduit par l'utilisateur (caractéristique du matériel utilisé)
- 10, 11: donné par l'utilisateur la position dans l'espace de l'essai (XYZ)
- 12: déduit par le système
- 13: choisi par l'utilisateur parmi un ensemble [1 --> valeur tout les 0.50 m.,  
2 --> tout les 1 mètre,
- 14: introduit par l'utilisateur (profondeur associée à chaque intervalle)
- 15: introduit par l'utilisateur; vérification intrinsèque des valeurs [Démon]
- 16: saisie par l'utilisateur; vérification intrinsèque des valeurs [Démon]
- 17: introduit par l'utilisateur, peut être remise en cause par le système
- 18,19: déduite par le système si un sondage en étalonnage a été réalisé à proximité de l'essai;  
non instancié dans le cas contraire. Cette précision peut prendre les valeurs de 0 à 100%
- 20: calculée par le système en fonction de l'intervalle de mesure (13) choisi par l'utilisateur
- 21: choisi par l'utilisateur parmi un ensemble [atteint,non-atteint,douteux,probable].

Le sondage 'Sondage\_8' a été réalisé en étalonnage de l'essai pénétrométrique 'penetrostatique\_36.

```
{ Sondage : Sondage_8
-- numSond : p2r2
-- date : ()
-- typeFor : sondage
-- nombrOutils : 2
-- profondeurs : [4.5]
-- outils : [carottier]
-- typeSondage : [Carotte]
-- coordonnees : [83.28,119.9]
-- profondeur : 4.5
-- cotes : [29.2,28.7,27.7,26.7,25.7,24.7]
-- couches : [Couche_40,Couche_41,Couche_42,Couche_43,Couche_44]
-- nombrCouches : 10
-- acceptSond : [Adapte,Adapte,Adapte,Adapte,Adapte]
-- substratum : non-atteint
-- nombrEchan : 2
-- echantillon : [Echantillon_88,Echantillon_89] }
```

[fig 61]. Sondage après analyse de cohérence

La correspondance entre ce sondage et l'essai donne:

nature de la couche	cote sondage	cote Essai	résistance St.
----- terre végétale	29.2		
----- silt sablo- argileux	28.7	28.7	900
----- argile raide marron	27.7	27.7	800
----- argile raide gris verdâtre	26.7	27.2	1500
----- argile raide gris foncé	26.7	26.7	1800
----- argile raide gris foncé	25.7	26.2	1900
----- argile raide gris foncé	25.7	25.7	2000
----- argile raide gris foncé	24.7	25.2	2100
----- argile raide gris foncé	24.7	24.7	1950

A partir de cette constatation le système procède à la vérification des valeurs de résistance statique connaissant la couche associée.

### 1.3.3 Cohérence de l'essai oedométrique

Nous présentons l'exemple de la saisie de l'essai oedométrique 'Oedometre\_65' [fig 62] et les traitements de cohérence associés.

Pour cet essai l'utilisateur dispose de deux variantes; la première consiste à introduire tous les paramètres; ainsi le système procède à une vérification; pour la deuxième variante, l'utilisateur n'introduit que les paramètres de l'essai et le système réalise le dépouillement.

```
{Oedometre : Oedometre_65
1 -- numOedo : oedo1
2 -- typeEssai : paliers
3 -- typeOedo : Terzaghi
4 -- numEchant : 5
5 -- diametre : 70
6 -- hautEprov : 24.3
7 -- contrainteTerre : 45
8 -- contraintEffect : [10,25,50,100,200,300,400,800] (Kpa)
9 -- indiceInitiale : 0.636
10 -- indiceVide : [0.635,0.632,0.630,0.622,0.599,0.563,0.555,0.510]
11 -- indiceCompress : 0.166
11 -- preconsolid : 150
12 -- confEss : 100 }
```

[fig 62]. Objet Oedometre instancié

12: proposé par l'utilisateur; elle peut être remise en cause après vérification par l'algorithme de calcul de l'essai oedométrique.

Dans l'objet couche nous avons l'attribut 'parametre-physique' dont la valeur est une instance de la classe de 'Physique' [fig 63] regroupant sous forme d'attribut un certain nombre de caractéristiques de sol; certaines d'entre elles sont mises en relation avec les caractéristiques issues de l'essai oedométrique 'Oedometre\_65' par l'intermédiaire de la couche 'Couche\_17'.

```
{Physique : Physique_45
-- profEssai : 2.25
-- PvSature : ()
1 -- PvHumide : 28.3 correction 20.3
-- PvSec : 16.2
-- teneurEau : 24.96 }
```

[fig 63]. Objet Physique instancié (données utilisateur)

1: Nous avons rentré volontairement une valeur éronné du poids volumique humide; le système compare la valeur introduite par rapport au domaine et trouve qu'elle est acceptable; une fois la couche connue, il nous informe par l'intermédiaire d'un message de la non validité de cette valeur.

### 1.3.4 Mise en relation

A partir des propriétés physiques de l'échantillon étudié, on refait les calculs pour infirmer ou confirmer la confiance donnée à l'essai [fig 64].

Aussi à partir de l'indice de vide, et des données ci dessus on peut déclencher en cascade le calcul d'autres paramètres physiques [fig 65]; les instances finales (Oedometre\_65 et Physique\_45) seront alors les suivantes:

```
{Oedometre : Oedometre_65

  -- numOedo : oedo1
  -- typeEssai : paliers
  -- typeOedo : Terzaghi
  -- numEchant : 5
  -- diametre : 70
  -- hautEprov : 24.3
1 -- positionEchantNappe : hors-nappe
  -- contrainteTerre : 45
  -- contraintEffect : [10,25,50,100,200,300,400,800]           (Kpa)
  -- indiceInitiale : 0.636
  -- indiceVide : [0.635,0.632,0.630,0.622,0.599,0.563,0.555,0.510]
  -- indiceMoyen : []
  -- preconsolid : 150
  -- indiceCompress : 0.166
2 -- etatConsol : surconsolide
3 -- etatCompress : moyennement-compressible
  -- couche : Couche_17
4 -- acceptEss : adapte
  -- confEss : 100 }
```

[fig 64]. Objet Oedometre instancié cohérent

- 1: déduit des informations données par le sondage
- 2: la pression de préconsolidation  $\sigma'_p$  est supérieure à la contrainte  $\sigma'_{vo}$   
 Si la pression de préconsolidation est > à la contrainte effective  
 Alors l'état de consolidation de ce sol est surconsolidé
- 3: déduite de l'indice de compression (sol moyennement compressible)
- 5: en fonction des informations données par le sondage, l'échantillon et la nature de la couche.

La mise en relation pour cet exemple est:

connaissant l'indice des vides ( $e$ ), la teneur en eau ( $w$ ), le poids volumique du sol sec ( $\gamma_d$ ) et le poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) le système détermine d'autres paramètres:

Physique : Physique\_45

```
-- profEssai : 2.25
-- PvHumide : 20.3
-- PVgrains : 26.503
-- PvSec : 16.2
-- PvEau : 10
-- teneurEau : 24.96
-- indiceVide : 0.636
-- porosite : 0.3888
-- compacite : 0.6112
```

[fig 65]. Objet Physique instancié (données utilisateur et déduites par le système)

### 1.3.5 Relations entre les essais:

Ces messages et informations sensibilisent l'utilisateur sur la validité de ces données. Grâce à la saisie de l'essai pressiométrique 'pressiometre\_31', de l'essai pénétrométrique 'penetro-statique\_36', nous montrons la vérification des résultats entre des essais différents. Avant de présenter les relations (vérifications), nous allons rappeler quelques corrélations concernant l'essai pressiométrique et pénétrométrique et l'essai pénétrométrique et l'essai oedométrique:

Ces corrélations proviennent d'une synthèse réalisé par Cassan [CASSAN, 88]:

argiles	$3 <$	$qc / (pl - p_0)$	$< 3.5$
(consolidées)	$3 <$	$E / qc$	$< 4.5$
(surconsolidées)	$5 <$	$E / qc$	$< 7$
limons		$qc / (pl - p_0) = 6$	
	$1.5 <$	$E / qc$	$< 3$
argiles	$8 <$	$qc / (pl - p_0)$	$< 10$
	$1 <$	$E / qc$	$< 1.5$

Les valeurs de corrélations présentées ci dessous proviennent d'une synthèse réalisé par Sanglerat [SANGLERAT, le pénétromètre statique-dynamique et ses diverses applications pratiques]

qc	w	Cc
$> 12$	$< 30$	$< 0.2$
$< 12$	$< 25$	$< 0.2$
	$25 < w < 40$	$0.2 < Cc < 0.3$
	$40 < w < 100$	$0.3 < Cc < 0.7$
$< 7$	$100 < w < 130$	$0.7 < Cc < 1$
	$130 < w$	$< 1$

Ce même auteur relie la résistance statique du pénétromètre au coefficient de compressibilité par un coefficient  $\alpha$  appelé coefficient pour fondation superficielle.

$$mv = 1 / (\alpha \cdot qc)$$

Pour l'argile peu plastique avec  $qc < 7 \text{ dan/cm}^2$  on a  $4 < \alpha < 6.5$ .

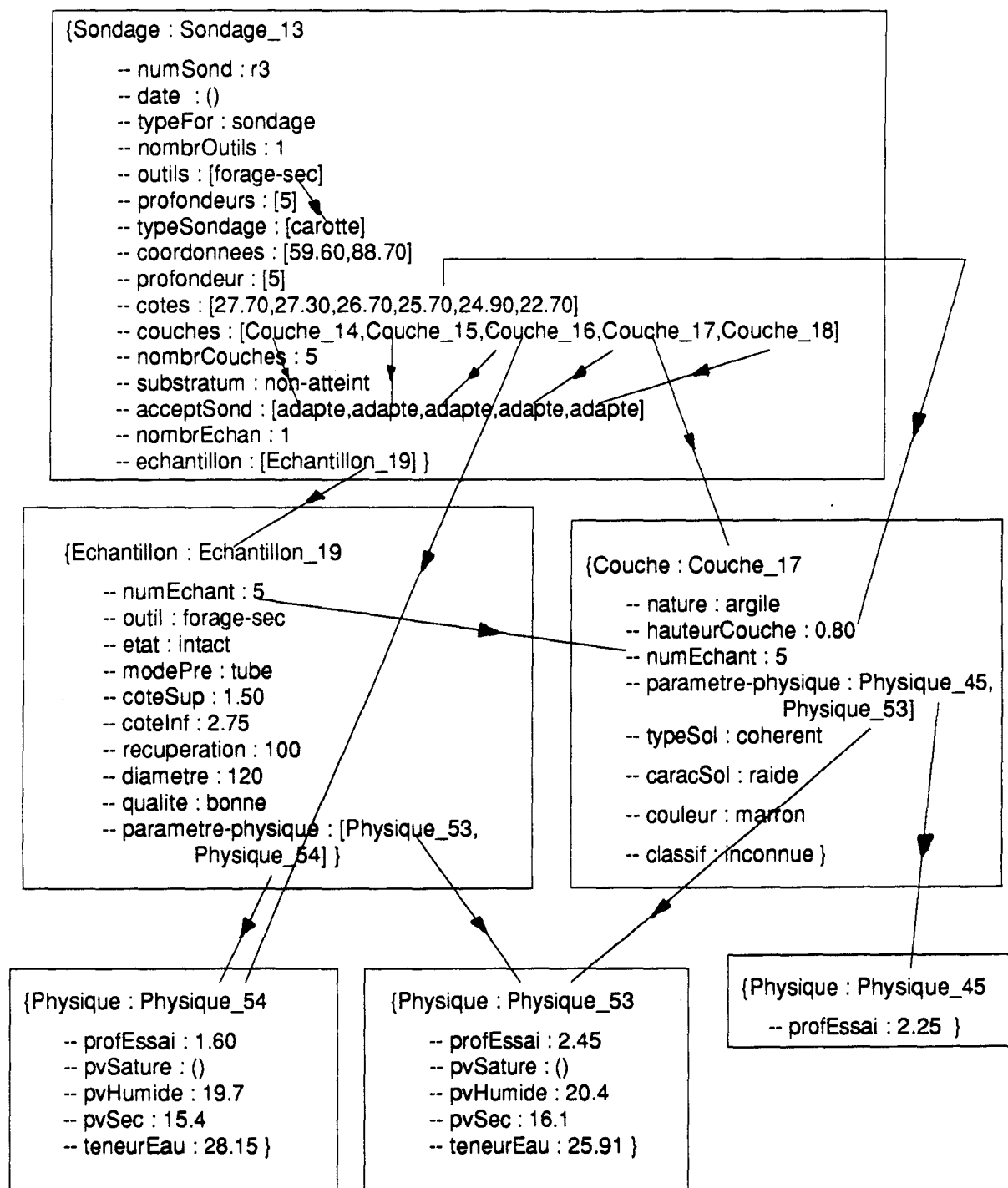
Au delà de 15m de profondeur l'auteur préconise de majorer le coefficient de 30% et le multiplier par deux pour les sols surconsolidés.

La première vérification a été réalisé entre l'essai pressiométrique et l'essai pénétrométrique selon le principe présenté en 3.2.6 de la deuxième partie.

La deuxième vérification est celle faite entre le pénétromètre et l'essai oedométrique; à défaut de valeurs pour le module oedométrique, les corrélations utilisées pour cette vérification concernent la résistance de pointe du pénétromètre statique, la teneur en eau de l'échantillon sur lequel a été réalisé l'essai oedométrique.

### 1.3.6 Relation entre les objets du projet

La juxtaposition de ces objets met en relief les relations (liens) existant entre eux et entre leurs attributs que nous avons mentionné au chapitre trois de la deuxième partie.



[fig 66]. Relations entre 'objets et attributs'

## 1.4 CONCLUSION

Nous avons vu à travers l'exemple précédent, les principaux types de traitements dans l'utilisation de la maquette:

- la saisie des objets,
- les relations entre les objets saisies (relation sondage - pressiomètre - couches,...),
- la déduction de paramètre (profondeur, porosité, poids,...),
- les vérifications concernant la cohérence de l'ensemble (géométriques, sondage,...),
- la triple vérification des paramètres (à travers la vérification intrinsèque, en connaissant la couche et par rapport à un autre essai),
- les vérifications de corrélations entre paramètres d'un même essai ( E/pl, pl/pf, poids volumique,...) et entre des essais différents (pressiomètre - pénétromètre),
- la compatibilité des essais et sondages avec les couches traversées,...

A partir de cet exemple, nous pouvons remarquer que la maquette permet:

- d'éliminer les erreurs de saisie,
- d'affiner les résultats de mesure,
- de rejeter les objets (essais, sondages) non conformes
- de vérifier la cohérence des objets concernés par le projet.

Le degré de précision attaché aux attributs d'essais est un paramètre qui est actuellement presque toujours laissé à l'appréciation de l'utilisateur.

La déduction du degré de précision est un élément qu'il faudra approfondir.

L'utilisation pratique de la maquette permet d'envisager des voies d'améliorations:

- en terme d'interactivité et convivialité: ainsi la saisie des essais in-situ, les coordonnées de la parcelle seront facilités par une interface graphique. Une visualisation permanente de l'état de saisie du projet et de l'étape des traitements nous semble nécessaire comme aide permanente à l'utilisateur.
  - en terme de validation ou d'exploitation de la base: la mise en place d'autres objets, l'enrichissement de la maquette par des expertises et le développement du module 'Traite-couche' pour l'estimation de paramètres en tout point.
-



## CHAPITRE 2 : COUPLAGE

### 2.0 PRESENTATION

Dans les applications d'infrastructures, les objets sont simples mais difficiles à gérer du fait de leur nombre et surtout de leurs relations et du fait qu'ils sont partageables par plusieurs intervenants.

Une approche intégrée de ces différentes applications doit prendre en compte les fonctions de base (gestion, calcul et expertise) et les outils associés; un système de gestion de base de données pour la fonction gestion, les langages de programmation classiques pour la fonction calcul (traitements de ces différents objets) et le générateur de systèmes à base de connaissances pour la prise en compte du savoir et du savoir-faire des concepteurs.

Dans un but d'intégration, il est nécessaire de faire coopérer ces outils; l'idéal serait donc, d'avoir un outil intégrant les trois fonctions et assurant la transparence des traitements, la persistance des données et la souplesse d'utilisation.

Plusieurs applications ont été développées au laboratoire; elles n'ont pas été implémentées sur les mêmes outils; il se pose alors le problème de leur communication.

Ces applications sont:

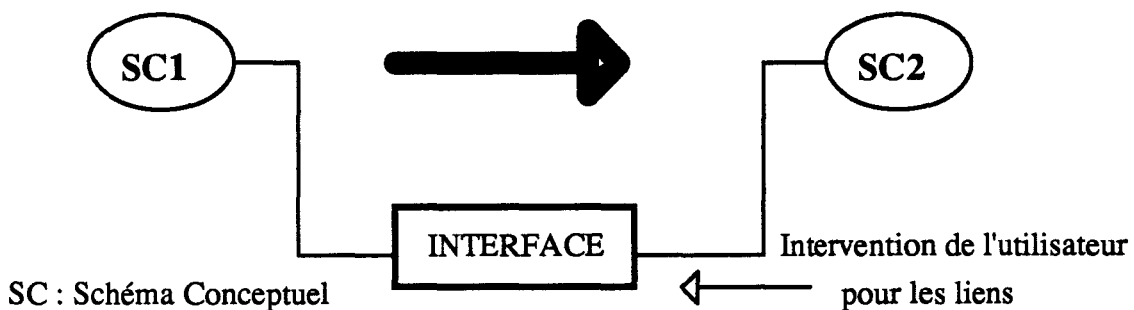
- EVALFOND: un logiciel d'évaluation technico-économique de fondations,
- KBTERRAS: un module technique relatif aux projets de terrassement,
- BDSOL: un module de gestion de données sur le sol.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents couplages réalisés pour mettre en communication ces applications.

### 2.1 LES DIFFERENTS COUPLAGES

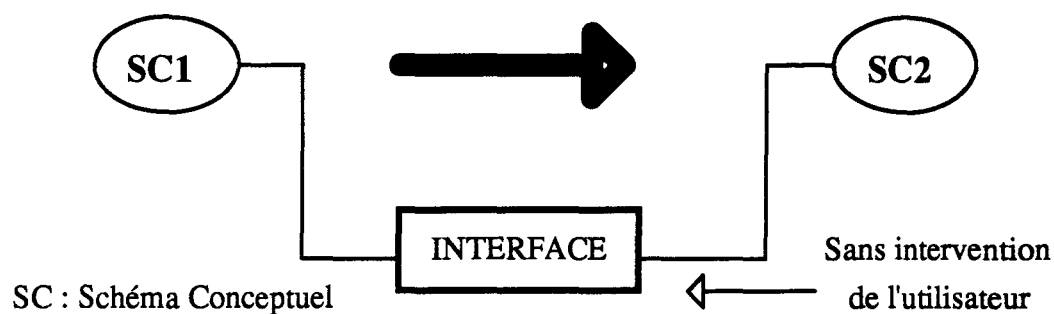
Différents types d'interaction entre applications peuvent être identifiées; pour éviter toute confusion, nous définissons trois types de couplage.

Le **couplage faible** présenté sur la figure 67 se caractérise par une perte d'informations et l'intervention de l'utilisateur pour gérer les différents liens entre les objets; c'est le cas du couplage entre KBSOL et EVALFOND.



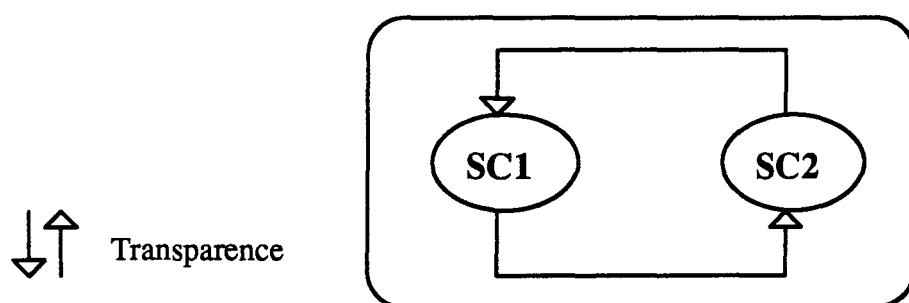
[fig 67]. Interface faible

Le **couplage fort** évite la perte d'informations mais, n'autorise pas une transparence d'utilisation; le couplage entre KBSOL et BDSOL en est un exemple [fig 68].



[fig 68]. Interface fort

**L'intégration** permet une transparence d'utilisation et évite la perte d'informations; elle concerne généralement des applications développées selon le même formalisme et implémentées sur la même plate-forme. la communication entre KBSOL et BDSOL et celle entre BDSOL et EVALFOND relèvent de l'intégration [fig 69].



[fig 69]. Intégration

## 2.2 COUPLAGE FAIBLE: KBSOL - EVALFOND

### 2.2.1 Présentation d'EVALFOND

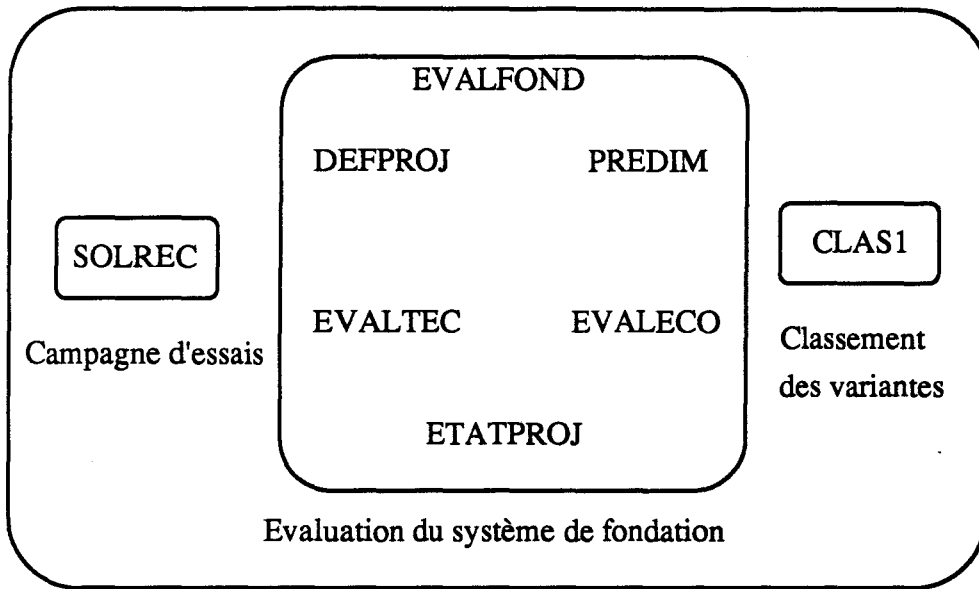
EVALFOND a été réalisé dans le cadre d'un travail de recherche au Laboratoire Méthodes et Habitat; sa présentation détaillée est dans [AL-HAJJAR, 89].

Il permet l'évaluation technique et économique d'une proposition d'un système de fondation et offre un moyen d'étude rapide de plusieurs variantes dans un temps compatible avec les exigences de la CAO; son but est de pouvoir traiter des bâtiments courants et de fournir un outil informatique prêt à être utilisé mais aussi ouvert, pour représenter une base de recherche dans le domaine.

Il permet aussi une analyse de variantes dans un esprit multicritères; cette analyse est basée sur la théorie des possibilités.

#### 2.2.1.1 La maquette d'EVALFOND

La maquette s'organise en un module "SOLREC" pour la reconnaissance du sol, un logiciel d'évaluation des fondations "EVALFOND" (composé de plusieurs modules) et un module de classement "CLAS1" [fig 70].



[fig 70]. Organisation du logiciel

Les différents modules sont:

**SOLREC** (sol-reconnaissance) : ce module sert à définir une profondeur de reconnaissance et à proposer une liste d'essais recommandés, pour la campagne d'essais.

Son utilisation pratique se situe en amont de l'évaluation d'une proposition d'un système de fondation.

**EVALFOND** (évaluation de fondation) : ce logiciel est en quelque sorte, le coeur de la maquette, il sert à l'évaluation d'un système de fondation et est composé de plusieurs modules.

**DEFPROJ** (définition du projet) : ce module représente la base de données du projet; y sont organisées les données relatives au sol, celles relatives aux éléments du système de fondations et informations générales sur le bâtiment projeté. Il représente le point d'entrée du logiciel.

**PREDIM** (prédimensionnement) : ce module sert à réaliser un premier dimensionnement des éléments du système de fondation proposé.

**EVALTECH** (évaluation technique) : ce module est divisé en deux parties; une est relative à l'évaluation de la portance, l'autre est relative à l'évaluation du tassement.

**EVALECO** (évaluation économique) : ce module permet de réaliser le quantitatif et l'estimatif d'une partie ou de l'ensemble du projet.

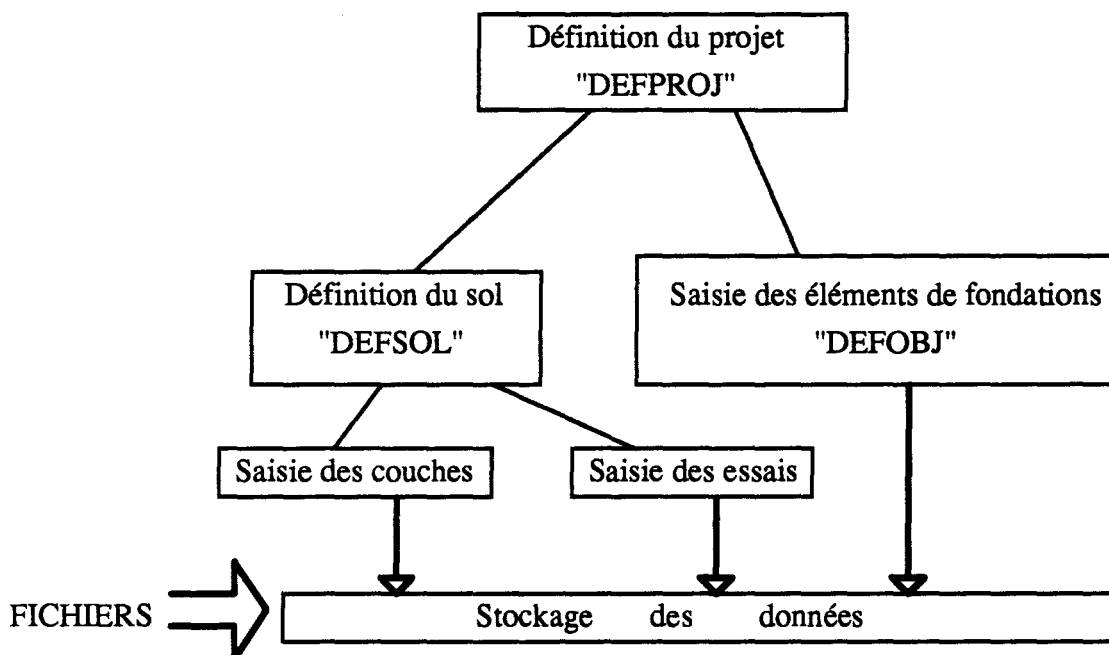
**ETATPROJ** (état du projet) : ce module propose une vision panoramique sur l'état du projet en cours de traitement.

**CLAS1** (classement) : c'est le module de classement des variantes selon les critères évalués dans "EVALFOND".

L'activation de ce module nécessite la définition des différents objectifs élémentaires (à atteindre) associés aux critères. Il est composé d'un programme d'acquisition des données nécessaires, d'un programme d'évaluation des performances et d'une bibliothèque d'opérations d'agrégation.

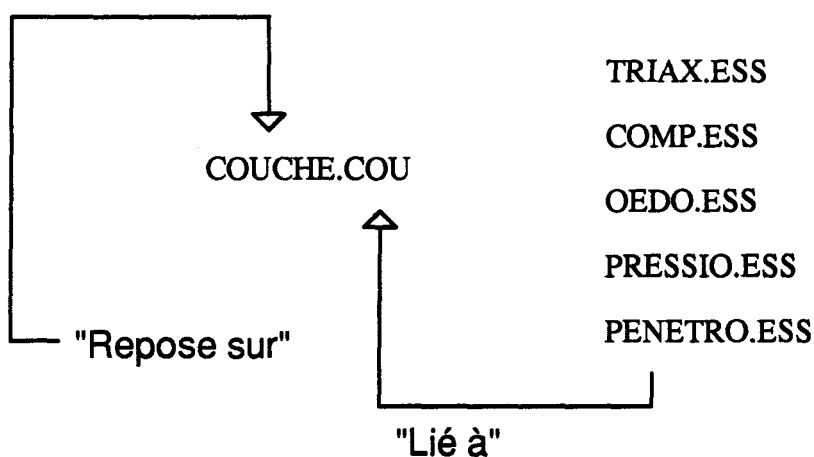
### 2.2.1.2 Organisation des données dans EVALFOND

Les données sont structurées en trois groupes d'objets [fig 71]: les couches, les essais et les éléments de fondations.



[fig 71]. Organisation et stockage des données

L'identification des relations "repose sur" et "lié à" entre les objets permet d'effectuer les traitements appropriés à l'évaluation des fondations [fig 72].



[fig 72]. Les différents liens

### 2.2.1.3 Schéma conceptuel: objets d'EVOLFOND

Dans EVOLFOND le sol est considéré comme une succession de couches de comportement différent; le comportement de ces couches est déduit des résultats d'essais de reconnaissances réalisés; la description complète nécessite la modélisation des couches et la modélisation des essais.

Un **élément de fondation** est décrit par des caractéristiques géométriques et les valeurs résultant des évaluations techniques et économiques; la description d'un élément de fondation dépend de la classe d'objets à laquelle il appartient dans la famille d'objets (fondations superficielles, semi-profondes et profondes).

Dans ce couplage nous nous intéressons uniquement aux données du sol; pour cela nous détaillons les deux objets "couches et essais pris en compte dans EVOLFOND; la description du schéma général est présentée en annexe...

#### La couche

Une couche de sol est décrite par son épaisseur, sa nature, son poids volumique, son pendage et l'état de la nappe.

H	nappe	pendage	nature	poids	numero

#### L'essai

Les essais pris en compte sont:

- en laboratoire (triaxial, boîte de Casagrande, compression simple et oedomètre),
- in situ (pressiomètre, penetromètre statique et dynamique).

La description d'un essai triaxial par exemple est la suivante:

l'identificateur, la cohésion, l'angle de frottement interne et la profondeur de l'échantillon.

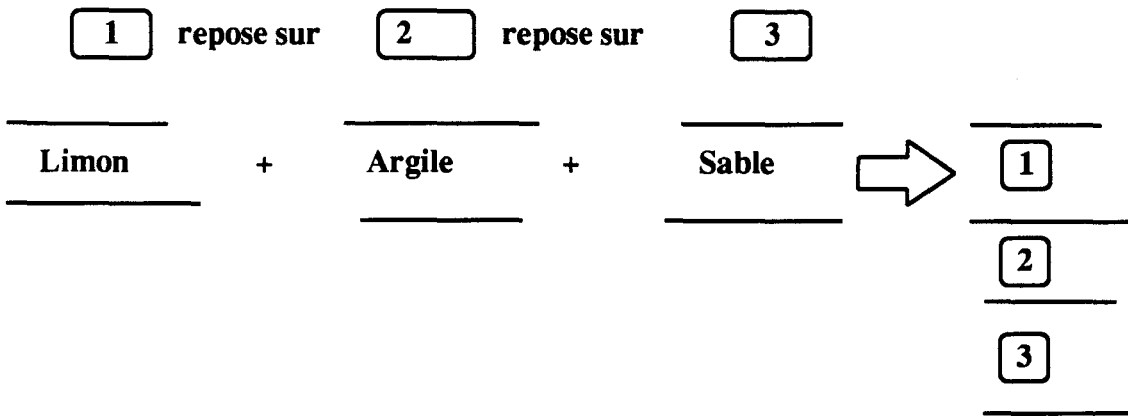
profondeur	cohésion	angle	numero

#### Génération d'un cas de sol et relations

Un cas de sol est lié à un objet fondation (élément de fondation ou partie du système de fondation); il décrit les caractéristiques générales et mécaniques des différentes couches présentes sous cet objet fondation; le sol de fondation sera donc vu comme un ensemble de cas de sol.

La génération d'un cas de sol [fig 73] est réalisée par la définition du nombre de couches en profondeur constituant le sol et par leurs caractéristiques .

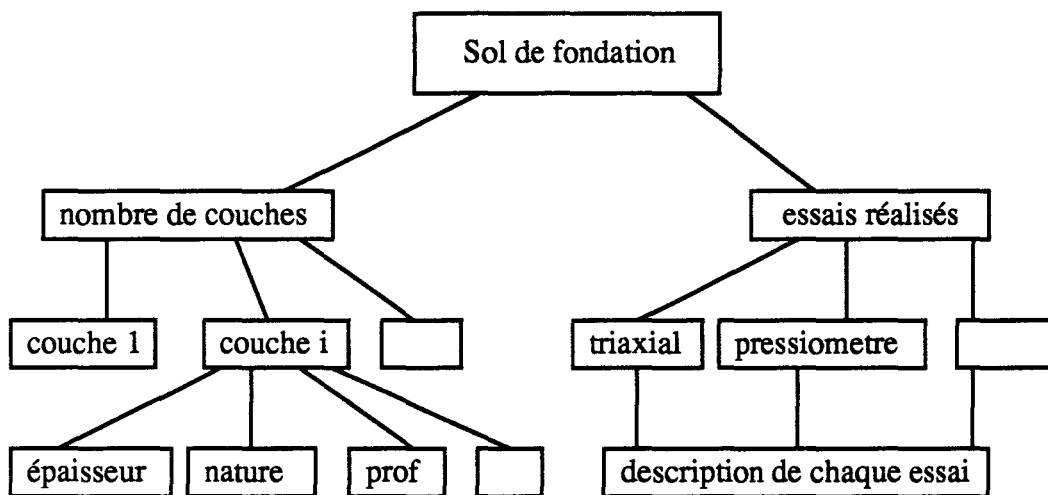
Deux couches sont liées par la relation "repose sur"; cette relation définie la profondeur à partir de laquelle une couche est présente, l'épaisseur étant connue, on peut générer un cas de sol.



[fig 73]. Génération d'un cas de sol

La relation de liaison entre la couche et un essai permet d'acquérir le comportement mécanique de chaque couche; la production du schéma du sol de fondation est alors possible si l'on précise que la fondation "repose sur" la couche 1.

La description générale du sol est illustrée par la figure 74.



[fig 74]. Schéma général adopté pour le sol

### Le projet de fondation

Il est obtenu par les objets du système de fondation (que nous n'avons pas présentés) et par un cas de sol de fondation (nombre de couches et essais réalisés).

### 2.2.2 Couplage faible: KBSOL - EVALFOND

#### objectif:

Des essais et informations sur le sol ont été introduites et prétraitées par KBSOL; l'objectif est de les utiliser dans EVALFOND pour un calcul de fondations.

### environnement de développement

KBSOL est développé dans un environnement orienté objet sur un système à base de connaissances (KOOL sur micro)

EVALFOND a été développé dans un langage procédural (Pascal sous DOS).

Les schémas conceptuels d'EVALFOND et de KBSOL sont non totalement compatibles.

Nous avons donc du construire le chaînage suivant:

KBSOL -----> EVALFOND

Celui ci est dirigé dans le sens KBSOL-EVALFOND;

### principe

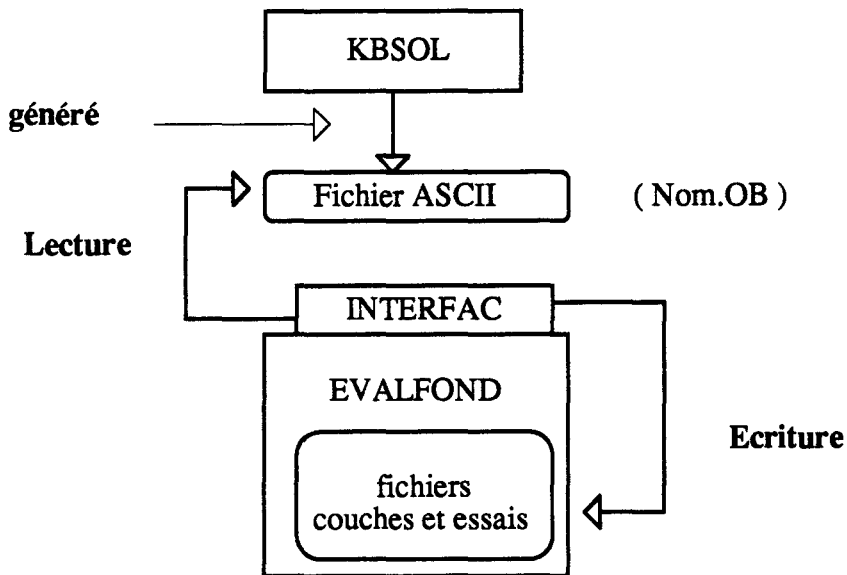
Le principe est de réaliser une interface logicielle dans un des deux environnement.

Pour respecter la logique d'utilisation d'EVALFOND, nous avons choisi de développer l'interface (INTERFAC) dans son propre environnement de développement.

Lancée à partir d'EVALFOND, INTERFAC lit les informations élaborées dans le fichier ASCII généré par KBSOL, puis les écrit dans les fichiers d'EVALFOND.

### schéma fonctionnel

Le passage des informations sur le sol de KBSOL dans le module EVALFOND se fait selon le schéma suivant [fig 75]:



[fig 75]. Principe du couplage

"Nom".OB constitue le fichier généré par KBSOL lors d'une application.

INTERFAC. unité composé de plusieurs procédures permettant de lire les instances d'un projet et les traduire physiquement dans la base d'EVALFOND.

Les deux principales procédures d'INTERFAC sont:

TRANS\_EVALFOND\_COUCHE

elle transforme les instances de la classe couche en enregistrements.

TRANS\_EVALFOND\_ESSAIS

elle transforme les instances des différentes classes d'essais en enregistrements.

### 2.2.3 Exemple de couplage

Une fois le projet traité par KBSOL, nous activons le programme principal d'EVALFOND auquel on a rajouté le module INTERFAC.

Nous proposons à travers cette exemple récupérer les instances de projet de KBSOL pour les traduire dans EVALFOND.

A partir du menu ci-dessous, notre choix sera récupération des couches:

<b>Définition du projet</b> *****	
0 .....	Récupération des couches du sol de fondation
1 .....	Définition des couches du sol de fondation
2 .....	essais réalisés
3 .....	Création des objets " élément de fondation "
4 .....	Retour menu principal
votre choix : <b>0</b>	

Ensuite, nous accédons à un sous menu pour procéder au transfert des données:

	<b><u>Récupérer</u></b>	Visualiser	Quitter
Choix:			
	<i>Projet.ob</i>	applic.ob	projet1.ob
<b>Les transferts de données</b>			

A partir de la commande 'Récupérer', nous avons sur ce graphe les objets 'couche' transférés dans EVALFOND.

Vous avez 10 occurrences d'objet "couche" *****					
H	Nappe	Pendage	nature	poids	numéro
0.4	0	2	10	15	1
0.5	0	2	8	20.2	2
0.6	0	1	8	20.3	3
1.4	0	2	4	19.5	4
3.1	0	1	5	19.8	5
1.9	0	0	6	18.7	6
0.2	0	0	6	18.9	7
0.8	0	0	6	20.2	8
0.1	0	2	6	20.3	9
11	0	0	7	18	10



De la même manière, nous procédons pour visualiser les objets 'essais':

Définition des essais réalisés	
*****	
0 .....	Récupération des essais
1 .....	Essai TRIAXIAL ou BOITE
2 .....	COMPRESSION SIMPLE
3 .....	PRESSIOMETRE MENARD
4 .....	PENETROMETRE STATIQUE
5 .....	OEDOMETRE');
6 .....	Retour menu précédent
votre choix : 0	

Une fois les essais récupérés dans la base d'EVALFOND, on demande à voir les essais pénétrométriques et les essais oedométriques:

Vous avez 9 occurrences d'objet d'objet 'pénétrromètre		
*****		
essai numéro: 1		
*****		
Contrainte totale (mètres)	résistance de pointe (Kpa)	frot lat unitaire (KN)
-----	-----	-----
0.5	9000	0.0
1	8000	0.1
1.5	1500	1.5
2	1800	2.5
2.5	1900	4
3	2000	6.9
3.5	2100	11.25
4	1950	14.5
4.5	2300	15
5	2500	20
5.5	2310	24.5
6	3500	29.3
6.5	5000	32.5
7	5200	40
7.5	7000	45
8	5600	47.5
8.5	6300	50
9	9000	53
9.5	20000	58

Objet penetro-statique dans EVALFOND

ESSAI OEDOMETRE  
2 occurrences d'objet  
\*\*\*\*\*

essai numéro: 1  
\*\*\*\*\*

Contrainte totale	Indice des vides
-----	-----
10	0.590
25	0.570
50	0.552
100	0.531
200	0.510
300	0.490
400	0.480
800	0.456

Objet Oedomètre dans EVALFOND

**2.2.4 Avantages et inconvénients du couplage faible KBSOL-EVALFOND**

L'avantage de ce couplage est de permettre à EVALFOND d'avoir accès à des informations élaborées sur le sol dont KBSOL a vérifié la cohérence et la validité.

Il améliore donc la qualité des résultats d'EVALFOND.

Les inconvénients beaucoup plus nombreux sont dus aux limites du modèle d'EVALFOND auquel ne peut pallier ce type de couplage; ces limites sont de deux types:

limites logicielles:

- la principale limite est due à une gestion par fichiers classiques: les fichiers de données élaborés par cette technique sont fastidieux à réaliser et souvent redondants,
- les modifications au cours d'un traitement dans l'ensemble des fichiers sont impossibles à gérer,
- la maintenance est très difficile à gérer, voire impossible,
- la capacité d'intégration est réduite, c'est une conséquence des remarques précédentes.

limites sur les objets:

- la première limite concerne la description incomplète des objets. EVALFOND n'ayant que les fondations pour objectif, les objets concernant le sol n'ont été que partiellement décrits; en conséquence certaines caractéristiques des objets de KBSOL ne pourront être exploitées.
- la deuxième est l'absence de liens entre les objets: l'utilisateur doit indiquer pour chaque élément de fondation l'identificateur de chaque couche et de chaque essai réalisé; ceci implique une intervention permanente de l'utilisateur au cours de traitement de l'ensemble.
- la troisième limite concerne l'absence totale de vérifications sur les objets et leurs propriétés.

## 2.3 COUPLAGE FORT: KBSOL - BDSOL

Nous voulons améliorer les capacités de gestion des données de KBSOL et fournir un noyau commun (BDSOL) pour mettre à disposition les données nécessaires aux différentes applications utilisant les données sur le sol.

KBSOL peut se servir également de la base de données BDSOL comme d'une bibliothèque de cas de sol réutilisable dans un nouveau projet.

La réponse à nos objectifs passe par l'utilisation d'un système de gestion de base de données; notre choix s'est porté sur un SGBD relationnel (ORACLE).

Avant d'exposer le couplage réalisé, nous présentons la plate-forme de développement ORACLE et la base de données BDSOL construite à partir de KBSOL.

### 2.3.1 Présentation de BDSOL

Avant de présenter BDSOL, nous décrivons les principes de la plate-forme de développement ORACLE.

#### 2.3.1.1 Présentation d'ORACLE

ORACLE est un système de gestion de base de données purement relationnel basé sur le langage SQL\*PLUS [ORACLE, 89], [ABDELATIF, 89]; il permet d'assurer:

- la définition et la manipulation des données,
- la gestion de la cohérence de données,
- la gestion de la confidentialité des données,
- la gestion de la sécurité,
- la gestion des accès concurrents.

En plus des fonctionnalités classiques d'un SGBD, ORACLE est caractérisé par l'ouverture de son architecture; cette ouverture est rendu possible grâce à la compatibilité avec d'autres SGBD, la portabilité des bases de données et des applications,... [GARDARIN et al, 87].

#### 2.3.1.2 Le schéma conceptuel de BDSOL

Les objets implémentés dans KBSOL ont été retranscrits sous un autre schéma conceptuel dans la base de données BDSOL [HADJ-RABIA, 91].

Le formalisme utilisé ici pour modéliser les données sur le sol est celui de la méthode MERISE; le modèle conceptuel des données a été réalisée à l'aide des trois concepts du formalisme:



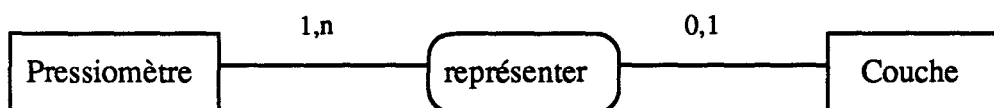
[fig 76]. Les concepts

L'**objet** ou individu est une entité pourvue d'une existence propre et conforme aux choix de gestion; par exemple les propriétés de l'objet parcelle sont présentées sur la figure 77:

Parcelle	(numéroProjet, numéroParcelle, numéroTerrain, coordX, coordY, cote, précision)
----------	--

[fig 77]. Objet Parcelle

La relation entre Objets est une association perçue dans le réel entre deux ou plusieurs entités; elle définit et détermine la filiation entre les objets; prenons par exemple la relation entre l'objet Pressiomètre et l'objet Couche



[fig 78]. Exemple de relation

- La relation "représenter" [fig 78] peut se traduire ici par:  
'le Pressiomètre représente une ou plusieurs couches'.
- La cardinalité permet de préciser la signification que l'on peut accorder à chaque objet; par exemple un essai pressiométrique représente une ou plusieurs couches (cardinalité 1,n), une couche peut être représentée par zéro ou un essai pressiométrique (cardinalité 0,1).

### 2.3.2 Couplage fort: KBSOL-BDSOL

BDSOL est la base de données regroupant toutes les données du sol prétraitées par KBSOL.

#### objectif

Des essais et informations sur le sol ont été prétraités par KBSOL. Notre objectif est de les mettre à la disposition des différentes applications faisant appel à ces données; ceci se fera par l'intermédiaire de BDSOL.

#### environnement de développement

KBSOL est développée dans un environnement orienté objet sur un système à base de connaissances (KOOL sous DOS)

BDSOL est développée dans un environnement relationnel (ORACLE sous DOS).

#### principe

Ce couplage consiste à recopier les instances d'un projet donnée traité sous KBSOL dans BDSOL.

Les objets sont les mêmes mais modélisés et implémentés dans un environnement différent; il n'y a donc pas de perte d'informations et les liens entre les objets sont automatiques; il s'agit d'un couplage fort.

Nous avons donc construit le chaînage suivant: KBSOL -----> BDSOL

Ce couplage est réalisé dans un sens unique de KBSOL vers BDSOL puisque cette dernière aura la fonction gestion seulement.

schéma fonctionnel

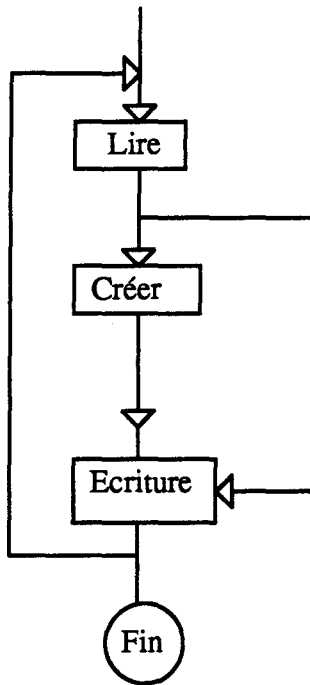
Les principales procédures utilisées sont les suivantes:

LitSQL: elle permet la lecture des instances de projet,

CreSQL: la création d'un fichier SQL,

TradSQL: la traduction dans le schéma conceptuel adopté pour BDSOL.

Ces procédures emploient les commandes SQL 'INSERT INTO' et 'COMMIT' respectivement pour l'insertion et la sauvegarde des données dans la base de données sur le sol; elles s'articulent selon le schéma suivant [fig 79]:



[fig 79]. Principe du couplage KBSOL-BDSOL

### 2.3.3 Exemple de couplage

Reprenons l'exemple précédent et faisons le transfert dans la base de données BDSOL.

Une fois les données transférées dans la base de données sol, nous présentons sous forme de tableau quelques requêtes sur la base de données; cette requête visualise les informations liées à un projet [fig 80].

CARACTERISTIQUE DE LA TABLE PROJET		
N° projet	1	
nom construction-bureaux__	date 21-JAN-92__	but construction__
stade _____	environnement urbain__	auteur_____
maître d'oeuvre _____	lieu Lille__	nombre d'essais 16__
nombre de labo 2__	nombre in-situ 14__	nombre de sondages 19__
nombre echant 6__		

[fig 80]. La table Projet

La requête suivante [fig 81] visualise le numéro, la description, la profondeur, le module pressiométrique et la pression limite de la couche dont le numéro associé est égale à un.

NUM_COU	DESCR_GEOT	PROF	NUM	E	pf	Pl	P0	Pl-P0
2	silt-sableux	0.90	1	2.4	0.25	0.44	0.008	0.437
4	argile-marron	1.90	1	5.5	0.32	0.55	0.018	0.532
4		2.90	1	6.4	0.34	0.56	0.028	0.532
5	argile-raide	3.90	1	7.5	0.46	0.67	0.038	0.632
5		4.90	1	9	0.59	0.88	0.048	0.832
5		5.90	1	11.5	0.63	0.99	0.058	0.932
6	argile-gris-sable-roux	6.90	1	21	1.17	1.60	0.067	1.533
6		7.90	1	11.5	0.85	1.28	0.076	1.204
10	sable-vert	8.90	1	7.5	0.67	1.06	0.078	0.982
10		10.40	1	16	1.02	1.51	0.086	1.424
10		11.90	1	10.5	0.71	1.21	0.099	1.111
10		13.40	1	8.5	0.79	1.20	0.112	1.062
10		14.90	1	11.5	0.90	1.40	0.125	1.275
10		16.40	1	9	0.64	1.12	0.138	0.982
10		17.90	1	12	0.87	1.40	0.151	1.249
10		18.90	1	15.5	1.04	1.60	0.164	1.436

[fig 81]. Résultats de l'essai pressiométrique

### 2.3.4 Avantages et inconvénients de ce couplage

#### Le schéma de correspondance

Ce schéma ne prétend pas montrer les lacunes du relationnel ou des représentations objet; il nous intéresse pour traduire les deux modèles et les faire communiquer entre eux; il constitue un pont entre les deux formalismes et permet de traduire les données de l'un dans l'autre et vice versa

En associant un ensemble de classes et un ensemble de relations, il rend possible l'enregistrement des classes et des instances dans la base de données sous forme de données relationnelles.

Pour rendre les données persistantes, il faut étendre le schéma de correspondance à tous les objets

Prenons l'exemple du schéma de correspondance de l'essai pressiométrique dans les deux formalismes [fig 82]. 'Resutpres' est une vue sur deux table 'couche' et 'pressiomètre', il permet de visualiser les résultat de l'essai pressiométrique.

**KBSOL**  
une classe

**BDSOL**  
deux tables

```
{Class : pressiometre
< -- numSond :()
  -- numPres : ()
  -- typePressio : ()
  -- typeSonde : ()
  -- diametreSonde : ()

  -- coordonnees : []

  -- cote : ()
  -- profondeur : ()
  -- nombrcouches : ()
  -- substratum : ()
  -- coteDepart : ()
  -- intervalle : []
  -- profInterval : []
  -- modulePressio : []
  -- pressionLimite :
  -- contraintePO : []
  -- pressionFluage : []
  -- confEssai : []
  -- acceptEss : []
  -- pl-po : []
  -- couches : []
>}
```

```
Table Pressiometre
  num_sond
  num_projet
  num_pres
  type_pres
  diametreSonde
  type_sonde
  coordX
  coordY
  cote
  profondeur
  nbrcouche
  substratum

View Resutpres
  num_couche
  descr_geot
  prof
  num_pres
  E
  pl
  pf
  pl-p0
```

[fig 82]. Schéma de correspondance de l'essai pressiométrique

Sur cet exemple nous notons une différence essentielle liée à l'absence de la notion d'héritage et surtout d'appartenance d'un objet à l'attribut d'un autre objet.

Cette remarque est vraie pour les modèles conceptuels de KBSOL et de BDSOL.

L'utilisation de la base de données BDSOL offre l'avantage de définir avec précision les objets constituant les projets d'infrastructures, ainsi que leurs interrelations.

Ce couplage a permis de mettre en place un noyau commun sur le sol; les intervenants peuvent puiser les données élaborées dans la base de données pour leur application.

L'inconvénient majeur du au couplage entre KBSOL et BDSOL réside dans le fait que nous ne pouvons pas utiliser certaines données (couches) pour pouvoir les exploiter dans le cadre du raisonnement (données persistantes) dans KBSOL.

Cette limite est essentiellement une limite informatique liée au système d'exploitation DOS; elle disparaît dans le système UNIX où l'intégration directe est possible.

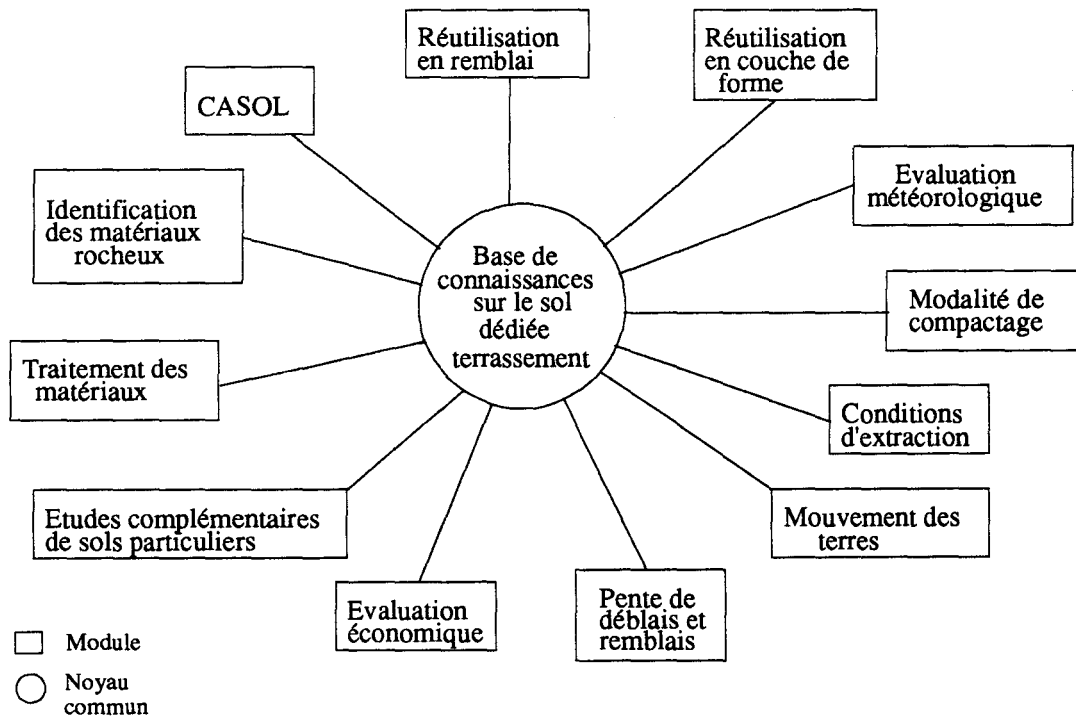
## 2.4 INTEGRATION: KBSOL - KBTERRAS

Nous avons vu dans les paragraphes précédents un exemple de couplage faible et un exemple de couplage fort; nous allons présenter le cas d'une intégration.

Le module technique KBTERRAS relatif aux travaux de terrassement est un travail en cours de validation au laboratoire [HENRY et al, 92]; il se base en partie sur les recommandations pour les terrassements routiers (RTR) publiés par le Setra , [HOLEF et al, 81], [SETRA-LCPC, 92].

### 2.4.1 Présentation de KBTERRAS

KBTERRAS est un ensemble de modules spécialisés prenant en charge les différentes composantes de la conception d'infrastructures (classification, réutilisation des sols, mouvements des terres, calcul des cubatures, ...) [fig 83].



[fig 83]. KBTERRAS

Actuellement, un de ces modules a été implémenté sur le GSE KOOL; il concerne la classification automatisée des sols (CASOL); les conditions de réutilisation des sols en remblais et en couche de forme sont en cours de validation.

CASOL s'appuie sur la classification RTR des sols, celle-ci repose sur l'identification des contextes de sol et de site.

Ce contexte est identifié par trois grandes catégories de paramètres de sol, paramètre de nature, d'état hydrique et de comportement mécanique.

A partir des déductions sur le sol issues de CASOL et des données météorologiques, on fournit les recommandations pour la réutilisation des sols en remblais et en couches de formes.



## 2.4.2 Le couplage

### objectif

Des essais et informations sur le sol ont été prétraités par KBSOL; l'objectif est de les utiliser dans le module KBTERRAS.

### environnement de développement

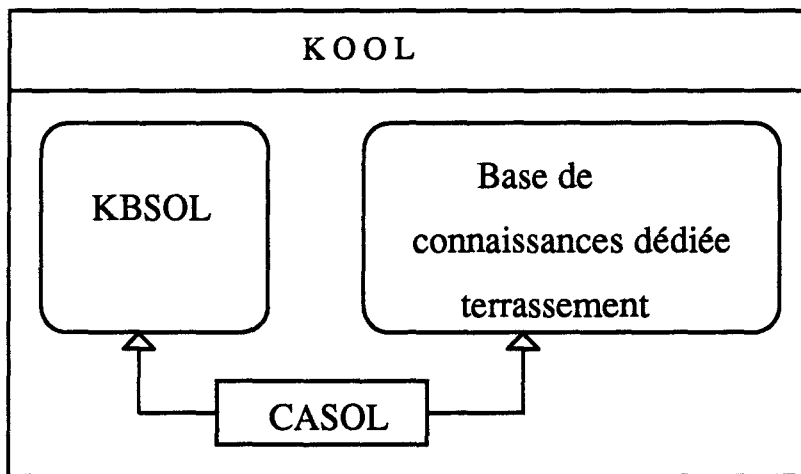
KBSOL et KBTERRAS ont utilisé le même formalisme et la même plate-forme de développement. ce qui assure une transparence de communication dans les deux sens.

Nous sommes donc dans le cas de l'intégration

La base de connaissances sur le sol relative aux terrassements ne constitue qu'une vue particulière de KBSOL; cette vue met en présence des informations issues des instances des classes couche et paramètre de KBSOL.

### principe

Le principe consiste à procéder par recopie des informations de la base KBSOL dans les classes 'Base nature' et 'Base hydrique' de CASOL [fig 84]; ces bases sont des structures de classe de caractéristiques contenu dans la classification des RTR, caractéristiques de nature et d'état d'humidité.



[fig 84]. Principe de couplage

## 2.4.3 Avantage du couplage KBSOL KBTERRAS

Ce couplage entre KBSOL et KBTERRAS offre la possibilité d'extension du champ d'investigation de l'utilisateur; ainsi à travers cette communication, l'utilisateur pourra:

- utiliser des données élaborées (vérifications des données saisies),
- prendre en compte d'autres caractéristiques de sol (déductions de paramètres en fonction d'autres paramètres,
- traiter des informations mêmes incomplètes (déduction, corrélations).

## 2.5 SYNTHÈSES SUR LES COUPLAGES ET PERSPECTIVES

Dans la perspective de l'utilisation concrète de KBSOL, nous avons envisagé son couplage avec deux applications faisant appel à la connaissance du sol.

Le premier couplage s'est fait avec un logiciel d'évaluation technico-économique de fondations (EVALFOND).

Pour pallier aux insuffisances du premier couplage et mettre en place un noyau sur le sol commun à plusieurs applications, nous avons réalisé un deuxième couplage qui passe par l'intermédiaire d'un SGBDR; ce couplage nous a permis de gérer efficacement les données issues de KBSOL à travers la base de données BDSOL et montre ainsi l'intérêt et la faisabilité du système d'information intégré.

Le troisième couplage a été réalisé avec le module technique KBTERRAS relatif aux projets de terrassement.

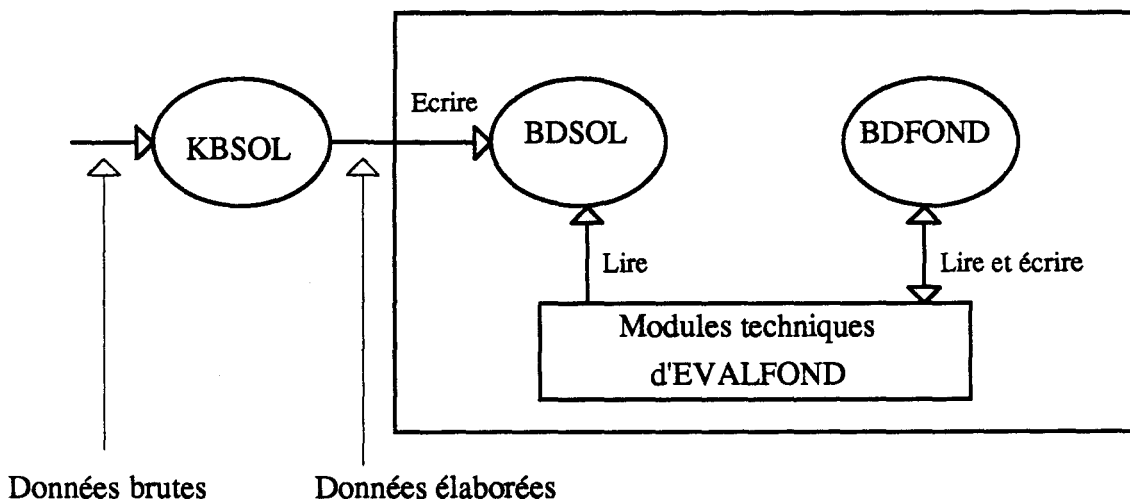
### 1) KBSOL ET EVALFOND

Pour pallier aux limites du couplage faible entre KBSOL et EVALFOND, nous avons choisi de passer par BDSOL; nous avons donc écrit BDSOL dans un environnement se prêtant aux traitements procéduraux tels que ceux d'EVALFOND.

Dans ces conditions et avec cette implémentation de BDSOL nous sommes dans un cas d'intégration entre BDSOL et EVALFOND.

L'utilisation de BDSOL oblige tout de même la traduction et l'enrichissement du schéma conceptuel des éléments de fondations d'EVALFOND sous forme de base de données pour les éléments de fondations (BDFOND) et la réécriture des modules technico-économiques dans le langage procédurale de communication (langage C).

Ces modules iront chercher les informations sur le sol et les fondations dans les bases de données relatives à travers l'interface programmable selon le schéma suivant [fig 85]:



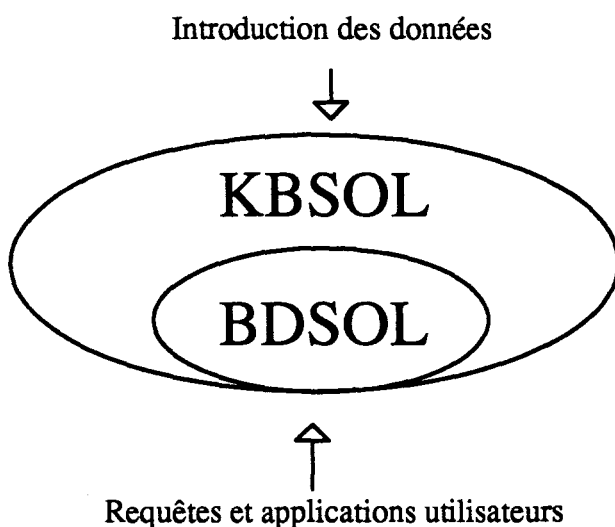
[fig 86]. Couplage KBSOL - BDSOL - BDFOND

Ce travail est en cours d'élaboration au laboratoire [ABOULFARAJ, 92].

## 2) KBSOL - BDSOL

BDSOL est la base de données sur le sol regroupant toutes les données prétraitées par le système à base de connaissances sur le sol KBSOL.

A travers le couplage fort de KBSOL et de la base de données BDSOL, KBSOL peut être utilisé comme une sur-couche experte autour d'une base de données qui pourrait être utilisée comme une banque de données [fig 86]. Le remplissage de la base sera assuré par KBSOL et les requêtes seront laissés au langage de requête de BDSOL.



[fig 86]. KBSOL - BDSOL (couche experte autour d'une base)

Le couplage fort de KBSOL vers BDSOL fonctionne bien; par contre le souhait de la réutilisation des couches de sol (issues de BDSOL) pour aider au raisonnement dans un le traitement d'un nouveau projet par KBSOL nécessite le passage inverse de BDSOL vers KBSOL ou en d'autres termes le couplage dans les deux sens,

Ce couplage inverse n'est pas réalisé en raison de difficultés liées principalement au système d'exploitation; ces difficultés disparaîtront dès le portage dans un environnement UNIX (les programmes d'interfaces entre KOOL et ORACLE existent et nous ont déjà été fournis par le CEDIAG [BULL, 89])

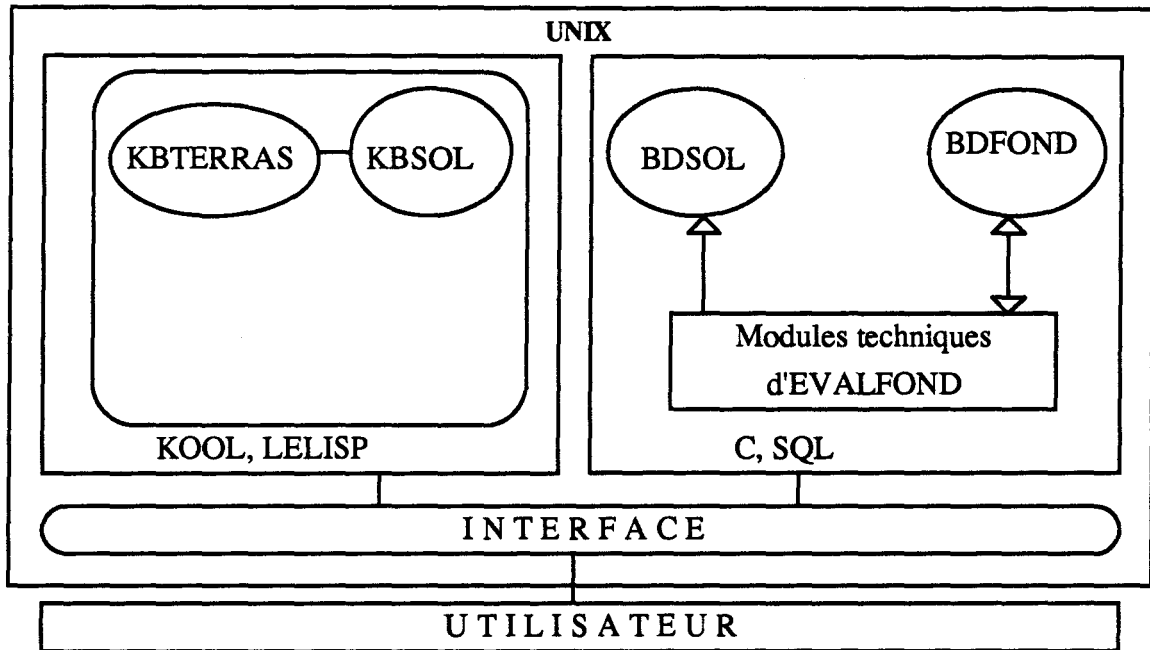
## 3) KBSOL - KBTERRAS

KBTERRAS est un ensemble de modules spécialisés prenant en charge les différentes composantes de la conception d'infrastructures.

La communication entre KBSOL et KBTERRAS est basé sur une même modélisation et le même outil de développement et de ce fait on peut la qualifier d'intégration; elle autorise dès à présent une utilisation transparente des données sur le sol.

#### 4)KBSOL EVALFOND BDSOL KBTERRAS: système intégré

Ainsi, à travers ces intégrations partielles et couplages forts, nous aboutissons à un système d'information intégré [fig 87]; toute nouvelle application pourra utiliser les informations communes sur le sol.



[fig 87]. Système intégré

## 2.6 CONCLUSION

Nous avons présenté des exemples de couplage ou de communication transparente entre différentes applications.

Ces exemples mettent en évidence l'utilité de l'intégration d'outils performants préexistants dans une nouvelle application; néanmoins, cette intégration nécessite une connaissance complète des schémas conceptuels et des structures de données des systèmes en présence.

## CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

L'implémentation nous a permis de constater l'utilité des langages à objet pour les applications du Génie Civil; la connaissance est répartie parmi les objets du système et de ce fait, son utilisation n'est pas limitée à priori.

Une connaissance incomplète ne bloque pas le déroulement du traitement; par exemple l'absence d'une donnée est signalée et la session est poursuivie jusqu'à l'obtention du résultat.

A travers cette implémentation, nous avons prouvé la validité du modèle conceptuel des données et du modèle des traitements.

A partir des différents scénarii réalisés, nous avons respecté les manières de travailler des différents intervenants des projets d'infrastructure.

Nous avons réalisé une application à travers la saisie d'un projet; nous avons volontairement introduit des données fausses pour déclencher certains mécanismes (associés aux attributs).

Du fait du traitement informatique d'un projet à l'aide d'un système à base de connaissances tel que KBSOL, le couplage avec une base de données permet de dégager deux intérêts :

- en entrée de KBSOL : l'utilisation de la base de données comme une base d'interrogation, c'est-à-dire son utilisation comme bibliothèque de cas de sol,
  - en sortie : l'utilisation de la base de données comme base de stockage de cas de sol dont les informations sont cohérentes, ce qui est rarement le cas dans les bases de données.
-

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Pour une meilleure prise en compte du sol lors de la conception des infrastructures, nous avons proposé l'analyse et la faisabilité d'une base de connaissances pour le sol.

La connaissance du sol est un élément primordial pour la conception des infrastructures; elle doit être accessible aux différents intervenants des sous-problèmes de l'adaptation au sol: fondations, voiries, réseaux, ...

La caractérisation du sol est entachée de nombreuses incertitudes liées aux outils, aux modes opératoires, au choix de la campagne de reconnaissance de sol adéquate, ...

Notre travail s'inscrit dans une démarche de conception assistée par ordinateur; nous avons donc exploré les outils existants (langages, SGBD, systèmes experts,...); en parallèle, nous avons recensé les dernières évolutions et réalisations en Génie Civil.

Le bilan de ces investigations, compte tenu de nos premières observations concernant le sol, nous a amené à retenir la voie de l'intelligence artificielle à travers les langages orientés objet et les systèmes experts.

Notre objectif a alors été la réalisation d'un système à base de connaissances construit à partir des résultats d'une campagne de sol qui permette d'avoir une appréciation de la qualité du sol en tout point; ce système doit être partageable par tous les intervenants et permettre aux différents modules techniques faisant appel aux données du sol de puiser les informations nécessaires dans un même noyau.

Nous avons répondu en partie au cahier des charges.

La modélisation mise en place à travers l'analyse du domaine, présente différents avantages:

- une représentation calquée sur le monde réel et permettant la lisibilité des objets et le rajout d'objets nouveaux,
- une séparation des données et des traitements permettant le rajout d'autres traitements
- une organisation en un modèle conceptuel de base où sont regroupées les différentes visions sur le sol associées à chaque technique.

Nous avons mis en place cette modélisation par application de la méthodologie KADS; cette méthode présente l'avantage de modéliser les connaissances statiques et dynamiques d'un domaine; elle permet aussi de prendre en compte les différents utilisateurs et ce au début de la phase d'analyse.

La maquette KBSOL implémentée sur KOOL a démontré l'intérêt d'un système à base de connaissances sur le sol.

L'utilisation du formalisme de KOOL (réflexes, méthodes, règles) nous a permis de gérer toutes les interdépendances entre les objets, entre les attributs d'un même objet, entre les attributs de plusieurs objets, entre les objets et les attributs d'un autre objet.

Pour améliorer le contrôle sur les données, la maquette est doté d'une bibliothèque (limitée) de cas de sols connus construite à partir d'une étude bibliographique.

Cette bibliothèque permettra de faire des comparaisons entre les cas de sol recensés et les couches introduites pour un traitement donné et de juger de la cohérence des informations.

Cette bibliothèque est auto-enrichissante puisque, à chaque nouveau traitement, elle sera complétée par les nouveaux cas validés à la demande de l'utilisateur et selon certains critères de fiabilité.

Pour atténuer les incertitudes liées au paramètres des sols, une voie possible est celle de l'utilisation des banques de données géotechniques; dans ce contexte KBSOL pourrait être utilisé comme une couche experte autour d'une banque de données géotechniques.

Les traitements que nous proposons sont exploitables de ce point de vue.

Notre étude à travers l'analyse de cohérence dans un environnement orienté objet est susceptible d'apporter une contribution à la prise en compte de la fiabilité des données stockées dans les bases et banques de données géotechniques.

Un des intérêts de KBSOL est sa flexibilité; en effet il permet à l'utilisateur le retour en arrière en cas d'informations suspectes en générant des sessions de travail.

Le couplage de KBSOL-EVALFOND, KBSOL-KBTERRAS et KBSOL-BDSOL valident l'utilisation de KBSOL comme noyau commun aux utilisateurs potentiels pour un projet d'infrastructure.

Nous avons présenté les avantages de KBSOL dans une situation idéale; c'est à dire une exhaustivité des traitements et d'une bibliothèque riche en cas de sol. Or notre expertise n'a pas été suffisante pour refléter cette situation idéale.

Nous n'avons exploité que des cas d'"école"; une confrontation avec des situations réelles doit pouvoir améliorer et corriger la pertinence du système tout en l'enrichissant.

Nous présentons les perspectives de notre travail sous deux aspects, interne et externe à KBSOL.

En interne, nous pensons ajouter:

- des méthodes techniques plus performantes pour mieux quantifier l'incertitude sur les variables,
- des méthodes sur l'interprétation des essais géophysiques et les liens entre ces essais et les essais géotechniques,
- le développement du module 'Traite-couche'.
- des méthodes de comparaison du sol étudié avec des cas de sols qualifiés par KBSOL et rangés dans une base de données.

En externe, nous envisageons:

- l'ajout d'une couche graphique interactive pour visualiser tous les essais, des coupes géologiques, ...
- l'ajout de modules techniques, tels que ceux dédiés à l'aménagement de la parcelle (voirie, réseaux,...).



## **BIBLIOGRAPHIE**

**ABDELATIF A., LE BIHAN J., LIMANE M.** -'Oracle : le système de bases de données relationnel.'- Eyrolles 1989.

**ADOLPHE L.** -'L'aide à la décision technique dans la conception architecturale : Application à l'énergétique du bâtiment.'- Thèse de doctorat en énergétique de l'école des mines de Paris, Mai 1991.

**AL-HAJJAR J.** -'C.A.O. et évaluation multicritère : éléments pour l'aide à la conception des fondations de bâtiment.'- Thèse de doctorat, Université de Lille I, Juillet 1989.

**AL-HAJJAR J., BOISSIER D., BOULEMIA C.** -'Building Substructural design as fuzzy decision model.'- Cerra-Icasp 6 Sixth international conference on applications of statistics and probability in civil engineering Mexico city, 1991, pages 1076-1083.

**AL-HAJJAR J., BOULEMIA C.** -'Couplage d'un logiciel d'évaluation des fondations à un système à base de connaissances sur le sol.'- Paris, Septembre 1992.

**AUBERT JP., DIXNEUF P.** -'Une méthode de conception et de programmation par objets.'- Génie Logiciel n°19, EC2, Nanterre Juin 90, pages 32-42.

**AZIBI N., GUENA F., ZREIK K.** -'Les systèmes experts dans le secteur du bâtiment et des travaux publics en France: Etat de l'art.'- Colloque Franco-Finlandais, Octobre 1988, pages 1-10.

**AZZOUZ R., FOUGERAS JC.** -'RECSOL: un didacticiel d'apprentissage de la reconnaissance des sols.'- Revue Française de géotechnique n°40 1985, pages 63-70.

**AZZOUZ R., BACCONNET C.** -'Optimal approach to the planning of network of in-situ soil test.'- Cerra-Icasp 6 Sixth international conference on applications of statistics and probability in civil engineering Mexico city, 1991, pages 652-659.

**BAILLY C., CHALLINE JF., FERRI HC., GLOESS PY., MARCHESIN B.** -'Les langages orientés objets.'- Cepadues, Toulouse 1987.

**BANCILHON F., BRIDON P.** -'Le SGBD O<sub>2</sub>'- Revue génie logiciel et systèmes experts, EC2 génie logiciel n°16, Septembre 1989, pages 38-40.

**BAYON R.** -'L'établissement d'un projet de bâtiment'- Volume 3, Eyrolles 1987.

**BEZZAZI M.** -'Etude des plans de masse de bâtiment par une approche système interactif d'aide à la décision.'- Thèse de doctorat, Université de Lille I, Novembre 1990.

**BIAREZ J., FAVRE JL.** - 'Corrélation de paramètres en mécanique des sols.'- Polycopie du Laboratoire de mécanique des sols et des milieux continus, Ecole Centrale des Arts et Manufactures 1976.

**BIAREZ J., FAVRE JL., HICHER PH. et RAHMA A.** - 'Correlation for granular media, classification logic and connections between classes.' Communication pour: the international conference on micromechanics of granular media, Clermont-Ferrand Septembre 1989, pages 201-209.

**BOISSIER D.** -'Contribution à la prise en compte des interactions "sol-fondation -bâti" dans la conception des bâtiments.'- Thèse de Docteur es sciences, INSA de Lyon 1982.

**BOISSIER D.** -'Concept probabiliste de la sécurité: application dans le domaine de la prévision du comportement des sols de fondation.'- INSA de Lyon 1983.

**BOISSIER D., MANGIN JC., MOUGIN JP.** -'CESSOL: an expert system for the specification of site investigation.'- International Conference Parc 83 Londres, 1983, pages 145-153.

**BOISSIER D., AL-HAJJAR J.** -'Logique floue et aide à la décision: application à l'infrastructure des bâtiments.'- Actes de 01 Design, Europa, Cabourg, Octobre 1990, pages 99-111.

**BOISSIER D., AL-HAJJAR J.** -'Proposition d'un système à base de connaissances sur le sol commun à tous les acteurs au long du processus de conception des bâtiments.'- The second International Workshop on Computer Building representation for integration - Aix-les-Bains, Juin 1991.

**BONNET A., HATON JP., TRUONG-NGOC JM.** -'Systèmes experts, vers la maîtrise technique.'- Interéditions, Paris 1986.

**BOUHERAOUA M.** -'Influence de la variabilité des propriétés du sol sur la consolidation des massifs de sols argileux.'- Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1989.

**<sup>1</sup>BOULEMIA C.** -'Base de connaissance sur le sol et aide à la conception des infrastructures.'- 9<sup>ème</sup> rencontre universitaire de génie civil sur le développement et de l'innovation en génie civil, Reims, Avril 1991.

**<sup>2</sup>BOULEMIA C., BOISSIER D., AL-HAJJAR J.** -'Base de connaissance sur le sol.'- IAHS (International Association for Housing Science), Alès, Septembre 1991.

**<sup>3</sup>BOULEMIA C., BOISSIER D.** -'Base de connaissance sur le sol: Implémentation sur KOOL.'- Communication pour le club KOOL, Chambéry, Mars 1991.

**<sup>4</sup>BOULEMIA C., BOISSIER D., AL-HAJJAR J.** -'A knowledge based system with uncertain for the soil.'- American Society of Civil Engineers (A.S.C.E.) Denver Colorado, Juillet 1992.

**BRIAND R.** -'Méthode de développement de systèmes experts.'- Eyrolles 1988.

**BRUNET E., BREUKER J.** -'La méthode KADS pour le développement des systèmes à base de connaissances.'- 10<sup>ème</sup> journées internationales, Avignon, 28 mai - 01 juin 1990.

**BULL** -'KOOL V2 documents logiciels'- Cediag, BULL (S.A.) 1989.

**CASSAN M.** -'Détermination probabiliste des caractéristiques en mécanique des sols.'- Colloque de Paris 1979.

**CASSAN M.** -'Les essais en mécanique des sols.'- Tome I: Réalisation et interprétation; TomeII : Applications et Méthodes de calcul des essais en mécanique des sols. Eyrolles, Paris 1988.

**CASTELLIANI X.** -'L'implémentation de concept fondamentaux du modèle MCO d'analyse et de conception des systèmes d'objets.'- 4<sup>ème</sup> Journées Internationales: Le génie logiciel & ses applications, Actes EC2, Toulouse, Décembre 1991, page 743-766.

**CEDIAG** -'MIKE : Methodology In Knowledge Engineering'- division service du CEDIAG (centre d'expertise et de développement en intelligence artificielle du groupe) 1990.

**COSTET J., SANGLERAT G.** -'Cours pratique de mécanique des sols.'- Tome I: Plasticité et calcul des tassement. Tome II: Calcul des ouvrages., Dunod 1988.

**CRIB, SEVANTES, UNSFA** : '-17 logiciels au banc d'essai.'- 1989.

**C.S.T.B** Centre Scientifique et Technique du bâtiment service informatique et bâtiment VALBONNE 1988.

**DECELLE AF.** -'ESTIME: un système de conception assisté par ordinateur destiné à l'évaluation technique des structures industrielles à ossatures métallique.'- Thèse de doctorat Université de Savoie, Chambéry 1990.

**DECELLE AF., LEFEVRE A., MANGIN JC., MONTICO J.** -'Architecture d'un système informatique intégré de conception en construction métallique.'- Actes du colloque: méthodes et outils pour l'ingénierie BTP. Université de Savoie, Chambéry 1989, pages 1-12.

**DELAHAYE JP.** -'Systèmes experts : organisation et programmation des bases de connaissances en calcul propositionnel.'- Eyrolles 1987.

**DELMAS D., GUYOT J., VAUDET JP.** -'Méthodologie ou comment choisir une méthode de développement.'- Les systèmes experts et leurs applications, 10<sup>èmes</sup> journées internationales Juin 1990.

**DTU.** -'Etude géotechnique et reconnaissance des sols.'- projet de DTU, Revue française de gestion n° 22, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Février 1983.

**DUBOIS D., PRADE H.** -'Théorie de possibilités: Applications à la représentations des connaissances en information.'- Masson, Mai 1985.

**DUFAU J., GALLEY H., MANGIN JC.** -'Intégration d'un modèle d'évaluation technique et économique de gros oeuvre de bâtiment dans un système de gestion de base de données réseau.'- C.A.O et robotique en architecture et BTP, Hermès 1986.

**DUFAU J., MANGIN JC., MOMMESSIN M., SAUCE G.** -'Modélisation et exploitation dynamique des connaissances et des données dans le projet CONCEPTOR.'- Actes EUROPIA, Liège 1990.

**DUPAGNE A.** -'Développement d'outils de simulation liés à la méthodologie du projet architectural.'- Séminaire spécialisé outils d'aide à la conception et à la gestion. AFME, Sophia-Antipolis, Octobre 1989.

**DYSLI M., RYBISAR J.** -'Deux banques de données géotechniques.'- Route et trafic, Lausanne, Juin 1986, pages 3-7.

**FAVRE JL.** -'Pour un traitement par le calcul des probabilités statistiques des problèmes de mécanique des sols.'- Thèse de troisième cycle, Université de Grenoble 1972.

**FAVRE JL.** -'Milieu continu et milieu discontinu, Mesure statistique indirecte des paramètres rhéologiques et approche probabiliste de la sécurité.'- Thèse de doctorat, spécialité: mécanique des sols et structures, Ecole Centrale d'Arts et Manufactures, Paris VI, 1980.

**FAVRE JL., HICHER PY., KERILIS JM.** -'Modelisol: A database for reliability in geotechnics'- Cerra-Icasp 6 Sixth international conference on applications of statistics and probability in civil engineering mexico city, mexico 1991, pages 746-752.

**GABAY J.** -'Apprendre et pratiquer MERISE.'- Masson 1991.

**GALLOUIN JF.** -'Transfert de connaissance Système expert: Techniques et méthodes.'- Eyrolles 1988.

**GARDARIN G.** -'Base de données, les systèmes et leur langage.'- Eyrolles 1984.

**GARDARIN G., VALDURIEZ P.** -'Base de données relationnelles: Analyse et comparaison.'- Eyrolles 1987.

**GOULETTE JP.** -'Astragale: une maquette d'étude sur l'articulation entre la phase d'esquisse et l'instrumentation du projet d'architecture.'- Actes Europa 1991, page 239-257.

**HABEJ-BEK T.** -'Prise en compte de l'adaptation au sol dans un système de CAO Bâtiment: Intégration de la composante "Fondations" dans le système X2A.'- Thèse de doctorat, Université de Savoie, Chambéry 1990.

**HADJ-RABIA K.** -'Réalisation d'un système d'information pour les études d'infrastructures.'- Rapport de D.E.A, LMH, Université de Lille I, Octobre 1991.

**HANROT S.** -'Transfert de connaissances architecturales vers une base orientée objet.'- Actes Europa 1988, pages 315-329.

**HART A.** -'Acquisition du savoir pour les systèmes experts.'- Masson, 1988.

**HARR M.** -'Mécanique des milieux formés de particules.'- Presse polytechnique Romande, 1981.

**HENRY E.** -'Langage orienté objets en Génie Civil: trois applications'- Rapport de DEA, LMH, Université Lille I Septembre 1990.

**HENRY E., BOISSIER D., BOULEMIA C.** -'Méthodologie orientée objets : application à une classification des sols.'- Communication pour le colloque géotechnique et informatique, Paris, Septembre 1992.

**HOLEF J., SCHAEFFNER M.** -'Terrassements routiers et ouvrage d'art.'- Séminaire de formation continue, Brazzaville, Décembre 1981.

**JAMES J., PERRY T., JOSEPH** -'Oracle par la pratique.'- Sybex 1990.

**LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées)** -'Prise en compte des conditions géotechniques dans les projets de canalisations d'assainissement'- Assainissement et géotechnique, étude inter-agence, 1988.

**LEININGER JP.** -'METACAD: un générateur d'applications orienté objet, exemple d'utilisation dans le domaine du bâtiment'- Actes Europa, Cima-Hermès 1988 pages 361-374.

**LEMAIRE B.** -'Banque de données géotechniques du sous sol, saisie et exploitation des données géotechniques.'- bulletin de liaison de laboratoire de ponts et chaussées n°76, 1975.

**LETELLIERS J.** -'Synthèse cartographique géotechnique de la région grenobloise, document graphique et traitement informatique des données.'- Thèse Docteur 3ème cycle Grenoble 1981.

**LONDE P.** -'Concepts probabilistes.'- Conférence à l'école centrale Paris, Juin 1979.

**MACGILCHRIST R.** -'Traitement de l'incertitude pour une probabilité de diagnostic.'- Intelligence artificielle et CAO en BTP. Recherche et application, Cima-Hermès, 1988 pages 123-140.

**MAGNAN JP.**-'Communication sur la mécanique des sols.'- Journées de mécanique aléatoire appliquée à la construction, (AFREM) 1984, pages 217-225.

**MAGNAN JP.** -'Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols '- Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1982.

**MANGIN JC.** -'Les nouveaux systèmes de CAO intégrant les techniques de l'intelligence artificielle.'- Laboratoire Génie Civil et Habitat Université de Savoie, CAO et IA 1987, pages 1-13.

**MASINI G., NAPOLI A., COLNET D., LEONARD D., TOMBRE K.** -'Les langages à objets: langages de classes, langages de frames, langages d'acteurs.'- InterEditions, Paris 1989.

**MERCIERA G.** -'Constitution d'un fichier géologique et géotechnique sur ordinateur: application à l'étude du remblaiement alluvial de la vallée de l'Isère.'- Thèse de Doctorat es sciences de l'USM de Lyon, 1977.

**MEYER B.** -'Conception et programmation par objet.'- InterEditions, 1990.

**MIRANDA SM., BUSTA JM.** -'L'art de base de données.'- Eyrolles 1984.

**MIRAMOND M.** -'Méthodologie de conception de bâtiment: Un système assisté par ordinateur: évaluation technique et économique d'avant-projet.'- Thèse de Doctorat es sciences de l'INSA de Lyon, 1981.

**MONCEYRON E., BARTHES JPA.** -'Intégration des techniques symboliques et numériques dans le processus en Génie Civil.'- 01-DESIGN, Cabourg, Octobre 1990, pages 31-42.

**NUYENS J.** -'Capacité portante et tassements des fondations à partir d'essais in-situ.'- Eyrolles, 1973.

**ORACLE** -'Documents logiciels.'- 1989.

**PASSARD P., SAYETTAT C.** -'CAP : Générateur Automatique de propositions d'études et diagnostiques des réseaux d'assainissements.'- Actes Europa 1991, pages 208-219.

**PEPIN H.** -'Introduction aux systèmes de gestion de base de données.'- Eyrolles 1986.

**PUTATTI J.** -'Technologie de la construction des bâtiments: Fondations-soutènement.'- Eyrolles 1979.

**REDOUIN P.** -'MERISE, comprendre et pratiquer.'- Editests 1989.

**ROLLAND C., FOUCAUT O., BENCI G.** -'Conception des systèmes d'information; la méthode REMORA.'- Eyrolles 1987.

**SETRA-LCPC.** -'Recommandations pour les Terrassements Routiers: Réalisation des remblais et des couches de forme.'- Première et deuxième parties, 1992 (à paraître).

**THOMAS A.** -'Principe et méthode de valorisation de l'information en mécanique des sols appliquée.'- Thèse de Docteur es sciences de l'INP de Lorraine 1975.

**VAN WAMBEKE A.** -'Les corrélations entre caractéristiques géotechniques.'- ABEM (Groupement de mécanique des sols et des travaux de fondations), Bruxelles 1974.

**VERDEYEN J., ROISIN V. NUYENS J.** -'Mécanique des sols.'- Presses universitaires de Bruxelles, Dunod, Paris 1968.

**VEZIN C.** -'SARMECA : un système d'aide à la représentation et la manipulation des éléments de composition architecturale.'- 01-DESIGN Cabourg 1990, pages 79-98.

**ZE M.** -'Apport d'un environnement objet pour la prise en compte de la composante énergétique dans la C.A.O. bâtiment'- dixièmes rencontres universitaires de génie civil, Cachan 1992, pages 191-198.

**ZREIK K. et Al** -'L'I.A dans le secteur du BTP: état de l'art de BTP, recherches et applications.'- Cima-Hermes 1988, pages 11-24.

---

# **GLOSSAIRE**



**ABSTRACTION:** L'abstraction des données est le mécanisme qui permet, à partir de plusieurs entités, de définir le concept décrivant les caractéristiques communes à toutes ces entités. Nous dirons alors que tous les éléments, ou objets, d'un même ensemble, ou classe, présentent les mêmes caractéristiques, ou propriétés, et qu'ils se distinguent par les valeurs de ces propriétés.

**ACQUISITION DES CONNAISSANCES:** Action qui consiste à collecter, acquérir d'un expert et interpréter des données sur le fonctionnement d'une expertise dans un domaine donné, afin de concevoir, construire, étendre, adapter ou modifier un système expert.

**ANALYSE:** Etape en amont de la programmation ayant pour but de décomposer un problème en différentes parties de manière à permettre la conception et la réalisation des algorithmes.

**ARBRE:** Collection d'informations homogènes organisées en niveau, où chaque information d'un niveau donné peut être reliée à plusieurs informations de niveau inférieur, par des branches ne formant pas de boucles (ex : arbre généalogique).

Un arbre informatique est défini de manière récursive comme étant soit vide, soit formé d'une racine reliée à plusieurs sous-arbres qui sont eux mêmes des arbres.

**ATTRIBUT:** Propriété spécifique d'un objet généralement décrit par un ensemble de caractéristiques standard appelées facettes (valeurs-possibles, valeur-par-défaut, valeur, unité,...). Exemple : la cohésion, l'angle de frottement, la couche,... sont des attributs de l'objet boîte-de-cisaillement.

**BASE DE CONNAISSANCES:** Ensemble des connaissances permettant la résolution de problèmes dans un domaine donné; elles sont exprimées dans divers formalismes complémentaires de "représentation de connaissances".

**CAO:** Conception Assistée par Ordinateur.

**CHAINAGE:** Une caractéristique du moteur d'inférence, quant à la manière d'exploiter les règles de production,

chaînage avant: la règle est déclenchée par la présence des faits de la partie condition.

chaînage arrière: la règle est déclenchée par la présence des buts à établir dans la partie conclusion.

chaînage mixte: il est utilisé par le système pour déduire la ou les connaissances d'un attribut, mais aussi pour propager les connaissances nouvellement connues.

**COEFFICIENT DE VRAISEMBLANCE:** Coefficient numérique affecté à une connaissance pour représenter sur une échelle donnée, le degré de certitude (ou selon les auteurs, degré de confiance, de crédibilité, de plausibilité,...) qu'on peut accorder.

**CONNAISSANCE:** "Toute connaissance est une réponse à une question" (Bachelard).

En intelligence artificielle, notamment dans le domaine des systèmes experts, on distingue :

-les connaissances profondes (deep knowledge); elles représentent le savoir faire qui est acquis par l'expérience et utilisé par l'humain dans la résolution des problèmes pratiques.

-les connaissances de surface (shallow knowledge); elles représentent le savoir, c'est à dire les axiomes, les théories, les principes et faits de base d'un domaine d'expertise.

**CONTROLE:** L'ensemble des moyens et des connaissances mis en oeuvre pour représenter les stratégies permettant de guider la résolution du problème.

**CYCLE DE DEVELOPPEMENT:** Le cycle de développement ne s'intéresse par définition qu'au développement d'un logiciel. C'est l'ensemble des phases de spécification du logiciel, de conception préliminaire, de conception détaillée, de codage, de tests unitaires, d'intégration et de validation, se succédant dans cet ordre.

**CYCLE DE VIE:** Ensemble des phases du cycle de développement auquel s'ajoute en amont, les phases d'étude des besoins et en aval, les phases d'exploitation, de maintenance et d'évolution.

**DEMON:** Procédure représentant une connaissance de type **REFLEXE**, immédiatement déclenchée lorsque certaines conditions sur l'état du système sont vérifiées; par exemple, l'attribution d'une valeur à la cohésion dans la base de connaissances déclenche un démon qui définit le type de sol (pulvérulent, cohérent); Voir aussi réflexe.

**ENCAPSULATION:** c'est un mécanisme destiné à la protection des informations. Le moyen proposé par la programmation par objet pour maîtriser la complexité des systèmes est de les simplifier en les décomposant.

Les classes d'objets définies par le mécanisme d'abstraction sont les composants élémentaires des systèmes décomposés.

Il convient cependant de remarquer que, pour que cette décomposition soit efficace et n'engendre pas de nouveaux problèmes tels que les interconnexions multiples et non contrôlées entre les composants, il est souhaitable de déclarer avec précision et de manière explicite quelles sont les parties qui seront accessibles de l'extérieur, parties publiques, et les parties qui ne le seront pas, parties privées.

**ENSEMBLE DE CONFLIT:** Dans un système à base de règles de production, pour un instant donné, il présente l'étape de stockage de toutes les règles en attendant que le moteur d'inférence les déclenche.

**FAIT:** élément simple de connaissances, qui est, soit établi (assertion), soit à établir (brut).

**FLOU:** (Théorie des sous ensemble flou), dans cette théorie proposée par Zadeh (Université de Berkeley, 1985), l'appartenance d'un objet  $x$  à un ensemble  $E$  n'est pas uniquement vraie ou fausse comme dans la théorie des ensembles classiques, mais est mesurée par une fonction dont la valeur varie de 0 à 1. Voir aussi logique floue.

**FORMALISME:** Ensemble de symboles et de règles caractérisant les arrangements possibles de ces symboles dans le but d'obtenir une représentation d'un objet réel ou d'un concept abstrait.

**FRAME:** Littéralement : cadre, trame. Un modèle de représentation de la connaissance (proposé par M.Minsky vers 1975), qui associe à un objet un ou plusieurs attributs (slots) le caractérisant; chaque attribut étant lui même défini par plusieurs facettes standard (dont la valeur), la valeur d'un attribut pouvant être aussi bien de type données que de type procédures.

**GRAPHE:** Objet mathématique défini comme un couple d'ensembles: l'ensemble des sommets et l'ensemble des arcs reliant les sommets. Ce support théorique est utilisé en informatique pour la représentation de connaissances reliées les unes aux autres, soit de façon structurelle ou fonctionnelle, soit encore sémantique. Voir réseau de transition pour l'analyse des langues naturelles, réseau sémantique pour la représentation de connaissances.

**HERITAGE:** Processus par lequel une entité "in-situ" peut conserver les mêmes propriétés que l'entité "essais". La classe "essais" représente les caractéristiques communes aux essais de laboratoire et aux essais in-situ alors que "in-situ", sous-classe de la classe "essais", décrit entièrement les essais in-situ.

**HEURISTIQUE:** Règle informelle de raisonnement, définie comme "l'art de bien deviner", par G.Polya. Moyen quelconque (règles, critères, procédures,...), généralement spécifique d'un problème donné, destiné à réduire les alternatives et guider les choix non déterministes.

**IMPRECIS(E)**: se dit d'une connaissance incomplètement identifiée (exemple: la cohésion du sol est d'environ 200 Kpa). Une règle est imprécise si elle invoque des faits imprécis en prémisses et/ou en conclusion.

**INCERTAIN(E)**: se dit d'une connaissance qui n'est ni complètement vraie, ni complètement fausse au sens de la logique classique. (exemple: le sol peut être de l'argile). Une règle est incertaine lorsqu'elle produit des conclusions incertaines même à partir de prémisses certaines. (exemple: si le matériau est stable, alors il est *vraisemblable* que la cohésion est élevée).

**INFERENCE**: Décrit les primitives de raisonnement, c'est-à-dire les traitements élémentaires transformant une information existante en une nouvelle information; ces diverses primitives sont regroupées dans une ou plusieurs structure (s) d'inférences.

Une structure d'inférence formalise une suite de transformations d'informations dans un cadre donné pour un objectif précis.

**INSTANCIATION**: En programmation orientée objet, l'instanciation désigne la création d'un objet particulier à partir d'un concept d'objets (classe).

L'exemplaire ainsi créé possède les propriétés générales du concept ainsi que quelques unes qui lui sont propres.

**INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**: Domaine pluridisciplinaire supporté par l'informatique visant à programmer les ordinateurs pour leur faire résoudre des problèmes qui jusqu'ici:

- n'ont pas reçu de solutions algorithmiques,
- et/ou sont trop longs, voire impossible à résoudre par les méthodes classiques de programmation.

Ces problèmes relèvent habituellement de l'intelligence humaine; l'IA est utilisée pour :

- le raisonnement (résolution de problèmes, démonstration de théorèmes,...),
- la reconnaissance de formes (images, paroles, ...),
- le traitement des langages naturels (compréhension de textes, traduction),
- l'apprentissage (par l'exemple, par l'essai-erreurs, ...),
- la découverte (de concepts abstraits; ...),

...

**KADS**: (Knowledge Acquisition and Design System) est une méthode de développement de Système à Base de Connaissances.

**KNOWLEDGE**: voir connaissance.

**KNOWLEDGE BASED SYSTEM**: voir système à base de connaissances.

**KOOL**: Knowledge representation Object Oriented Language.

**LANGAGE ORIENTE OBJET (LOO)**: Langage de programmation fondé sur le concept d'objets représentant la connaissance. Chaque objet est décrit par ses attributs; ils représentent les noms des propriétés de l'objet. Les attributs de type procédural sont généralement appelés méthodes. Un objet peut être représenté dans une hiérarchie, et hérite des propriétés d'objets plus généraux que lui. La communication avec et entre les objets se fait par l'envoi de messages. Les LOO sont nés de LISP, SIMULA, et PLASMA, aux USA, à partir de 1975.

**LISP (LIst Processing)**: Langage évolué de programmation, fonctionnel, récursif se fondant sur l'unique représentation en liste des données et des traitements.

J.MacCarty, l'un des pères de l'IA, a créé LISP en 1960, au MIT et depuis LISP est le principal langage de l'IA. Des normalisations sont en cours (Common LISP, Eu-Lisp) [WERTZ, 85].

**MESSAGE:** L'unique moyen de communiquer avec et entre objets d'un LOO.

**META:** Préfixe qui désigne ce qui est au-dessus, ce qui englobe. **Métaconnaissance:** connaissance sur les connaissances. **Métarègle:** règle sur la façon d'utiliser d'autres règles.

**METHODE:** Procédure attachée à un objet, activée à réception d'un message et assurant une certaine manipulation des informations contenues dans cet objet.

**MIKE:** Méthodologie de développement d'un système expert en KOOL.

**MOTEUR D'INFERENCE:** Mécanisme procédural de raisonnement exploitant une base de connaissances.

**OBJET:** Sens général: Support de représentation d'un élément de connaissances (exemple: fait, règle, procédure, etc..., sont les objets manipulés par le moteur d'inférence).

Sens spécifique de la programmation et des langages orientés objet : Support de représentation structurée de connaissances contenant un ensemble d'attributs qualifiant l'état de l'objet et un ensemble de méthodes décrivant les actions associées à l'objet.

**REFLEXE:** Procédure attachée à une facette, et qui est automatiquement exécutée, lors d'une manipulation particulière ( ex : ajout ou modification des valeurs) sur l'attribut auquel se rapporte la facette. Voir aussi **démon**.

**REGLE DE PRODUCTION:** Un couple situation-action, ou prémisses-conclusions, pour exprimer que dans une certaine situation, on peut déclencher une certaine action, ou encore qu'en présence de certaines prémisses, on peut faire certaines conclusions.

**REGLE D'INFERENCE:** En logique formelle, règle de réécriture permettant d'établir de nouveaux théorèmes à partir d'axiomes donnés (exemple: le modus ponens, le modus tollens, la spécialisation universelle, la règle de résolution).

**REPRESENTATION CENTREE D'OBJETS:** Mode de représentations de connaissances, axé sur la structuration du domaine étudié en objets, au sens des LOO.

**RESEAU D'INFERENCE:** Graphe résultant de la pré-compilation d'une base de règles de production.

**RESEAU SEMANTIQUE:** Graphe étiqueté permettant de représenter un ensemble de connaissances reliées entre elles par des liens de nature sémantique, la nature et la signification des liens étant portées par les arcs du graphe.

**RETOUR-ARRIERE :** Processus qui consiste à remonter la dernière action exécutée (la dernière séquence d'actions exécutées), afin d'essayer un nouveau cheminement, (ne pas confondre avec le chaînage arrière).

**SLOT:** Voir attribut.

**STRATEGIQUE:** décrit le plan de résolution du problème posé et les connaissances nécessaires au contrôle de celui-ci. Il précise les connaissances caractérisant le comportement des experts et leur adaptation en fonction du contexte ; un plan de résolution précise l'ordonnancement des buts à atteindre pour résoudre le problème et, ainsi formalisé, le comportement de résolution du problème.

**SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES:** Système d'IA dont le comportement se fonde sur l'exploitation contrôlée d'un ensemble de connaissances propres au domaine traité.

**SYSTEME EXPERT:** Système sur un domaine spécialisé, recueilli généralement auprès d'un ou plusieurs experts humains chevronnés, et capable de performances comparables à celles de ces experts.

**TACHE:** décrit les étapes du raisonnement: les buts, et la manière d'atteindre ces buts: tâche structurée. Une tâche structurée précise comment les structures d'inférences sont mises en application pour réaliser un but.

**TACHE D'UN SYSTEME EXPERT:** Travail imparti au système expert en regard de celui que réalise une expertise.

**TACHE GENERIQUE:** Activité ou comportement d'un individu que l'on peut mettre en évidence quel que soit le domaine d'application de cette activité ou de ce comportement.

**VALIDATION:** La validation d'un système expert s'attache d'une part à la validation du système en comparaison avec la démarche et les connaissances de l'expert, d'autre part à la vérification de l'implémentation des connaissances du système par rapport aux règles du formalisme choisi pour leur représentation.

