

N° d'ordre : 401

50376
1989
245

50376
1989
245

THESE DE DOCTORAT

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE LILLE / FLANDRES-ARTOIS

Pour obtenir le grade de Docteur
Spécialité : GENIE CIVIL

Par

Jihad AL-HAJJAR

Ingénieur E.N.S.M.N.

**C.A.O. ET EVALUATION MULTICRITERE :
ELEMENTS POUR L'AIDE A LA CONCEPTION
DES FONDATIONS DE BATIMENT**



Soutenu le 7 Juillet 1989 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury :

MM.	J.P.	HENRY	Président
	P.	LAREAL	Rapporteur
	J.C.	MANGIN	Rapporteur
	D.	BOISSIER	Directeur de Thèse
	H.	JONES	Examineur
	M.	MIRAMOND	Examineur



A V A N T P R O P O S

Ce travail a été effectué au laboratoire "Méthodes et Habitat" de l'I.U.T de Béthune (Université de LILLE-FLANDRES ARTOIS).

Monsieur le professeur BOISSIER m'a confié le thème de cette étude. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour l'aide et les encouragements qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier monsieur le professeur HENRY, de l'USTL/FA, pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury.

Monsieur le professeur MANGIN, de l'université de Savoie, et monsieur le professeur LAREAL, de l'INSA Lyon, m'ont fait l'honneur d'accepter de juger mon travail. Je suis très sensible à l'honneur qu'il me font, je les remercie vivement.

Je tiens à remercier monsieur MIRAMOND, de l'INSA de Lyon, d'avoir bien voulu me faire l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury.

Je suis particulièrement reconnaissant à monsieur Jones, de Middlesex Polytechnic (Grande Bretagne), d'avoir bien accepté de faire partie de ce jury. Je l'en remercie vivement.

Je ne saurais oublier d'exprimer ma reconnaissance à tous mes collègues chercheurs au laboratoire et plus particulièrement monsieur BOULEMIA, pour la sympathie qu'il m'ont témoignée.

Enfin, je remercie tout le personnel de l'IUT de Béthune qui a assuré avec beaucoup de gentillesse l'achèvement de l'impression de ce document.

... à mes parents

R E S U M E

Les systèmes de Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O) orientés bâtiment ont pour objectif d'aider le concepteur à maîtriser globalement le projet; pour cela ils doivent être pluri-techniques et intégrer les différents aspects de ce projet autour d'une modélisation commune.

Notre objectif est de permettre l'intégration de la conception des fondations dans ces systèmes au même titre que les autres composantes du projet.

Nous proposons, dans cette étude, une analyse de la conception du système de fondation en Avant-Projet depuis la définition de la campagne de sol jusqu'au choix d'une solution compatible avec l'objectif du concepteur.

Cette analyse porte essentiellement sur les points suivants:

- description des différents éléments du projet (sol-superstructure-fondation) par des modèles appropriés, compatibles avec l'état des connaissances à ce niveau,
- évaluation technique (portance et tassement) et économique des éléments de fondation par des méthodes adaptées au niveau de l'avant-projet,
- prise en compte de la nature imprécise des paramètres du sol, par l'utilisation d'une méthode de sélection multicritère basée sur la théorie des sous-ensembles flous pour aider au choix du système de fondation.

Ces travaux ont été concrétisés par la réalisation d'une maquette informatique.

S U M M A R Y

Computer Aided Design (C.A.D) systems for Building aim at helping the designer to globally master the project; thus they must deal with various techniques and integrate the different aspects of the project around a common modelling.

Our objective is to allow the integration of the conception of foundations into these systems along with the other components of the project.

In this survey, we propose an analysis of the designing of the foundation system at a Preliminary Stage, from the definition of a site investigation to the choice of a solution that might be compatible with the designer's objective.

At this stage of the project, this analysis essentially deals with the following points :

- Describing of the various elements of the project (soil-structure-foundation) by appropriate models compatible with the available data,
- Assessing, economically and technically (Bearing capacity, settlement) of the foundation elements through adapted methods,
- Taking into account the unaccurate nature of the soil parameters, by using a multicriteria selection method based on the fuzzy logic in order to choose the foundation system.

These works have had their application in software.

S O M M A I R E

<u>INTRODUCTION</u>	1
 <u>PREMIERE PARTIE : LE CONTEXTE DE L'ETUDE</u>	
Introduction	3
<u>1- Le projet de fondations d'un bâtiment</u>	4
1.1- LE CONTEXTE DU PROJET	4
1.1.1- Le processus de conception du bâtiment	4
1.1.2- Vision multitechnique du bâtiment	6
1.1.3- L'étude de l'infrastructure	9
1.2- L'OBJET DE L'ETUDE	12
1.2.1- La reconnaissance du sol	13
1.2.2- Le traitement du système de fondation	15
1.2.3- Le choix d'un système de fondation	20
<u>2- La C.A.O et l'approche multicritère</u>	29
2.1- LE PROJET BATIMENT ET L'OUTIL C.A.O.	29
2.1.1- Représentation et structuration des données	30
2.1.2- Les outils existants	32
2.2- APPROCHE MULTICRITERE ET DECISION	35
2.2.1- L'approche multicritère	35
2.2.2- La théorie des sous-ensembles flous et la décision	38
Conclusion de la première partie	48

DEUXIEME PARTIE : EVALUATION ET AIDE AU CHOIX D'UN SYSTEME DE FONDATION

Introduction	49
<u>1- Modèle conceptuel</u>	50
1.1- LES MODELISATIONS	50
1.1.1- Les objets de la superstructure concernés	50
1.1.2- Un modèle approché du sol	51
1.1.3- Les éléments du système de fondation	55
1.2- LES RELATIONS ET LES SCENARIOS	56
1.3- LIMITES DU MODELE ET CONCLUSION	57
<u>2- Etude et évaluations des fondations</u>	58
2.1- LA CAMPAGNE D'ESSAIS	58
2.1.1- La profondeur de reconnaissance	58
2.1.2- Les essais	61
2.2- LE PREDIMENSIONNEMENT	63
2.3- EVALUATION DE LA PORTANCE	64
2.3.1- Fondations superficielles	64
2.3.2- Fondations profondes	71
2.4- EVALUATION DU TASSEMENT	76
2.5- EVALUATION ECONOMIQUE	81
<u>3- L'aide à la décision vis-à-vis d'objectifs flous</u>	84
3.1- PROBLEMATIQUE DE LA DECISION	84
3.2- FORMULATION DES OBJECTIFS	85
3.2.1- Estimation de la fonction d'appartenance	86
3.2.2- L'objectif "STABILITE"	87

3.2.3- L'objectif "TASSEMENT"	89
3.2.4- L'objectif "Coût"	90
3.2.5- Le rôle du décideur	91
3.3- LA DEMARCHE D'AGREGATION ET LE ROLE DU DECIDEUR	91
3.4- DISCUSSION ET CONCLUSION	93
Conclusion de la deuxième partie	96

TROISIEME PARTIE:MAQUETTE INFORMATIQUE ET EXEMPLES D'APPLICATIONS

Introduction	97
<u>1- L'environnement de la maquette</u>	97
1.1- Généralités	97
1.2- Architecture sommaire	98
<u>2- Etude des modules et exemples d'applications</u>	99
2.1- LE MODULE RELATIF A LA CAMPAGNE D'ESSAIS	99
2.2- LE LOGICIEL D'EVALUATION DES FONDATIONS	103
2.2.1- La définition du projet	104
2.2.2- Le prédimensionnement	109
2.2.3- Modules d'évaluation technique	113
2.2.4- Module d'évaluation économique	119
2.2.5- Critiques et améliorations possibles	122
2.3- LE MODULE DE SELECTION	123
2.3.1- Préparation des données	123
2.3.2- Base de raisonnement et performances	126
2.3.3- Jugement du décideur et agrégation	128
2.3.4- Sensibilité de la méthode et conclusion	131
2.4- PERSPECTIVES	133
Conclusion de la troisième partie	135

<u>CONCLUSION GENERALE</u>	136
----------------------------------	-----

ANNEXES

Annexe 1	Structuration des données dans "EVALFOND"	138
Annexe 2	Hypothèses générales sur le sol de fondation	142
Annexe 3	Méthodes de calcul de la portance des fondations	144
Annexe 4	Méthodes de calcul du tassement des fondations ..	154

<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	158
----------------------------	-----

INTRODUCTION

I N T R O D U C T I O N

le contexte

L'utilisation de Systèmes de Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O) dans le secteur du bâtiment est devenue une réalité depuis quelques années. L'aptitude qu'offrent ces systèmes à assumer des fonctions aussi diverses que gérer des données, visualiser des objets complexes et évaluer techniquement des solutions ont favorisé la pénétration de la C.A.O dans ce secteur pourtant caractérisé par une activité de conception éclatée entre ses différents acteurs. Il faut noter que cette pénétration a pris des formes très différentes selon les besoins des professionnels qu'ils soient maîtres d'ouvrages, concepteurs-architectes, bureaux d'études techniques, économistes de la construction, entreprises, services techniques, ...

Les problèmes liés à l'intégration des différentes composantes pour l'aide à la conception technique des bâtiments sont étudiés de manière fondamentale dans quelques laboratoires universitaires; la réponse à certains de ces problèmes s'est concrétisée par des maquettes ou des systèmes informatiques; le prototype X2A [1-X2A] est un exemple d'une telle concrétisation; il intègre des modèles d'évaluation technique (structure, thermique, acoustique,...) autour d'un système de modélisation et de gestion de données orienté bâtiment.

L'intégration de la composante "adaptation au sol" et plus précisément des fondations, pose des problèmes inhérents à la nature même des données utilisées et à leur structuration; en effet il est possible de décrire un sol de fondation par de multiples aspects, sous différentes formes et avec des diverses précisions; de plus la continuité (mécanique, fonctionnelle et constructive) entre l'infrastructure et la superstructure pose des problèmes spécifiques en génie-civil. Les conséquences d'un mauvais choix des fondations sur la totalité de l'ouvrage font que les sinistres de fondations sont probablement les plus coûteux et les plus longs à régler; ceci implique qu'il est nécessaire de prendre en compte la conception et le dimensionnement de cette partie du bâtiment le plus tôt possible dans le processus de conception.

Le Laboratoire Méthodes et Habitat de l'Université de Lille-I.U.T de Béthune développe des activités de recherche autour de cette problématique générale; ces études concernent essentiellement les objets de l'infrastructure et la prise en compte des relations entre ces objets; entre autres, l'étude des réseaux sous la parcelle, les relations entre le bâtiment et l'environnement de la parcelle (urbanisme, réseaux,...), la modélisation du terrain naturel et du sol, la prise en compte des relations entre ces différents objets et la communication entre des schémas conceptuels différents sont des sujets en cours d'études dans le laboratoire.

le travail de recherche

Le volet principal de notre travail de recherche concerne la composante d'évaluation technique et économique d'un système de fondation de bâtiment (en excluant les ouvrages spéciaux, ouvrages d'art...); cette analyse concerne un niveau de conception précoce, généralement celui de l'Avant-Projet; ce niveau sera précisé à chaque fois que nous proposerons des méthodes et des solutions aux sous problèmes posés.

L'importance de la connaissance du sol sous le bâtiment pour l'étude technique des fondations nécessite la réponse à quelques problèmes posés lors de la campagne de reconnaissance. L'étude de cette campagne, dans ce mémoire, est limitée aux deux facteurs qui conditionnent le plus la qualité des résultats qu'elle dégage : la profondeur de reconnaissance et la compatibilité des essais géotechniques avec la nature des couches traversées.

L'étude technique nécessite, outre la définition des méthodes d'évaluation de la portance et du tassement des fondations, une description du sol compatible avec l'état de connaissance à ce stade du projet. Une modélisation du sol, simplifiée dans l'optique de son utilisation future au cours du projet de fondation, est proposée. L'évaluation technique et économique des différents éléments du projet est alors possible; elle permet ainsi de faire un constat global du système de fondation.

Le deuxième volet concerne le classement des différentes propositions évaluées selon les trois critères pris en compte dans cette étude : la portance, le tassement et le coût de l'opération. La nature incertaine de plusieurs données nécessaires à l'évaluation des propositions a privilégié l'adaptation d'une méthode basée sur la théorie des sous-ensembles flous apte à bien représenter l'incertain dans l'acte de décision.

le mémoire du travail

Dans la première partie, nous présentons tout d'abord le cadre de notre étude et les problèmes liés à la conception du système de fondation de bâtiments; nous faisons ensuite le point sur l'approche C.A.O et sur les méthodes de sélection multicritère.

La deuxième partie est consacrée à la description de la modélisation proposée pour les différents éléments du projet, des méthodes d'évaluation retenues, et de la démarche, spécifique au contexte de notre étude, de la sélection multicritère.

L'organisation de la maquette informatique et l'étude de ses différentes composantes sont développées dans la troisième partie; des exemples d'application montrant les possibilités actuelles et les améliorations possibles de cet outil de recherche complètent cette présentation.

Première Partie:

Le contexte de l'étude

INTRODUCTION

Les contraintes d'urbanismes ou architecturales provoquées par l'implantation des bâtiments sur des terrains imposés a priori, placent les maîtres d'oeuvre et les projetteurs devant des problèmes de fondation difficiles à résoudre et souvent fort coûteux en raison de la mauvaise qualité du sol : l'idée de bâtir impose l'adaptation au sol.

Deux composantes principales apparaissent dans l'étude des fondations : la campagne de sol et le système de fondation. En effet, une grande partie des informations nécessaires à cette étude provient des résultats de la campagne. Celle-ci sera vue dans cette étude comme un facteur important pour la poursuite d'un projet de fondation. Le choix d'un système de fondation va dépendre en partie, de la qualité de cette campagne.

L'aide à la conception de bâtiment impose la prise en compte des interactions entre les différentes composantes (thermique, structure, fondations...) du projet. Cette vision globale multitechnique du bâtiment nécessite la gestion d'une grande quantité de données diverses. Les aides informatiques et l'approche C.A.O offrent des réponses précieuses à cette vision globale par des outils d'aide à la gestion des données et à la visualisation. L'aide au choix d'une solution dite "meilleure" dans notre cadre d'étude, doit prendre en compte le caractère incertain des données nécessaires à l'évaluation des propositions d'un système de fondation.

Le premier chapitre de cette partie est consacré à l'étude des fondations dans le contexte de la conception des bâtiments; nous dégageons les principaux problèmes posés à cette étude et définissons le cahier des charges du travail à réaliser. Cette analyse montre l'importance des données à gérer et l'interaction avec les autres composantes du bâtiment; elle met aussi en relief l'existence de plusieurs sources d'incertitudes sur l'évaluation technique des éléments. C'est dans le deuxième chapitre que nous évoquons l'approche C.A.O et l'analyse multicritère, éléments de réponse à ces problèmes constatés.

1- Le projet de fondations d'un bâtiment.

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 éléments qu'elles relient de façon ultime.

Le terrain est une donnée extérieure imposée, pour un plan de masse donné, alors que plusieurs variantes peuvent être envisagées pour la superstructure. Le problème posé au concepteur est de trouver une solution globale répondant à toutes les exigences : mais cette vue est assez théorique [2-BAYON]. En effet, le maître d'oeuvre, qui conçoit un bâtiment, néglige généralement le problème des fondations, laissant au technicien le soin de le résoudre afin d'apporter le moins de contraintes et de modifications possibles à la superstructure.

Or, le code civil rend responsable le technicien en cas d'accidents dû à un vice du comportement du sol. D'autre part les fondations sont régies par plusieurs D.T.U et soumises à des règles précises. Les sinistres de fondations sont les plus coûteux et les plus long à régler.

La solution des problèmes de fondation 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 sous l'ouvrage impose une adaptation au terrain.

Nous présentons dans ce chapitre une analyse de la conception des fondations de bâtiments et développons les problèmes posés à la conception du système de fondation.

1.1- Le contexte du projet.

1.1.1- Le processus de conception du bâtiment

Généralités

Un bâtiment est toujours un prototype, vivant et évolutif dans le processus de conception. Cet objet à concevoir peut être considéré comme un système dans un milieu extérieur [3-BOISSIER]. L'objet réalisé doit satisfaire des objectifs exigeants de nature physiologique, sociologique, mais aussi fonctionnels dépendant du mode de vie.

La fonction de base de l'objet à réaliser est de protéger l'utilisateur du milieu extérieur (protection des intempéries, protection des nuisances, privatisation d'un espace...). Certaines fonctions du système ne sont pas explicitées par l'utilisateur : il suffit que la construction soit stable, que le type de structure ne crée pas de désordres visibles et qu'il n'observe pas de tassement significatif.

Ces fonctions non explicites sont traduites par le concepteur, par la notion de sécurité.

Processus de conception et phases normalisées

En projet de bâtiment, le passage de l'idée à la réalisation est assez long et compliqué. Afin de faciliter la rémunération et le partage des responsabilités, le processus de conception a été découpé en phases de conception normalisées en ingénierie publique. Chaque étape constitue le support de l'étape suivante.

Rappelons les principales phases [4-CAVALINI] :

- 1- Etudes préliminaires (hors normalisation).
- 2- Avant-projet, permis de construire, choix de parti.
- 3- Projet de consultation.
- 4- Consultation des entreprises.
- 5- Désignation des entreprises.
- 6- Plan d'exécution.
- 7- Travaux, Bilan.

Une décomposition plus synthétique du processus (en ne considérant que les phases de 1 à 6) peut être la suivante:

- La conception PRIMAIRE : cette phase correspond à l'A.P.S, elle constitue l'élaboration du programme, la définition des principales caractéristiques du projet.

- La conception SECONDAIRE : il s'agit dans cette phase de confirmer les décisions prises en A.P.S et les compléter par les principes de construction (définition et évaluation du projet) .

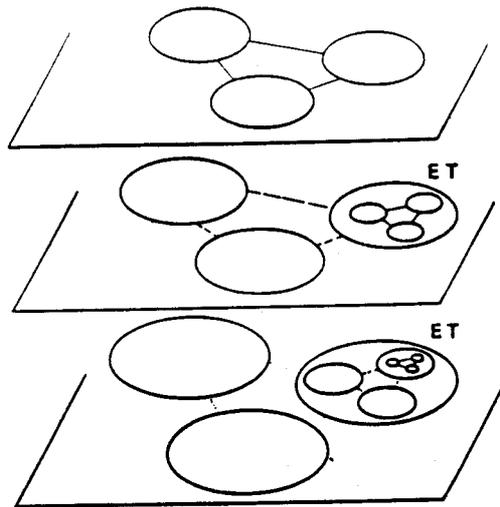
- La conception TERTIAIRE : cette phase se concrétise par les plans d'exécution des ouvrages (P.E.O) et les spécifications techniques détaillées (S.T.D) .

QUINTRAND [5], propose une division semblable des tâches en Intention-Projet-Réalisation. Si cette décomposition par étape est sûrement nécessaire pour la maîtrise du processus de conception, elle n'est pas complète. MIRAMOND [6] propose une formalisation verticale puis horizontale pour répondre à l'insuffisance et la complexité de la décomposition précédente.

La conception en phase d'Avant-Projet

On s'aperçoit que l'étude d'un projet de bâtiment nécessite la maîtrise des problèmes et interactions propres à chaque niveau (formalisation horizontale) -fig 1-

fig 1- réf. [6]



La décomposition chronologique (verticale) se justifie par le fait que chaque phase recouvre des problèmes différents et mobilise des méthodes et des outils spécifiques.

Si beaucoup de ces problèmes de pris en compte des interactions ont été résolus en phase de conception secondaire et tertiaire, tel n'est pas le cas en phase d'Avant-Projet Sommaire (A.P.S). Or c'est à ce stade que les choix et les décisions semblent les plus déterminants pour la suite du projet. En effet, la conception tertiaire fait appel à des règles et un savoir-faire propre à chaque discipline, de manière relativement séparée. Dans la phase secondaire cette séparation est moins nette pour devenir quasi-absente en phase primaire où la liberté d'action s'avère très importante [8-DUFAU].

Les outils d'aide doivent permettre au concepteur, en A.P.S, d'étudier le maximum de variantes et de pouvoir les sélectionner afin qu'il puisse aborder la phase suivante avec le minimum d'incertitudes possible.

L'objet de notre étude se situe dans la phase de production d'A.P.S, niveau où les décisions semblent être les plus difficiles vue la qualité et l'imprécision des données dont on dispose, et les plus importantes de part leurs conséquences sur la suite du projet de conception.

1.1.2- Vision multitechnique du bâtiment

Les différentes visions du bâtiment

La complexité du système bâtiment en tant qu'objet à réaliser et la nature hétérogène des problèmes à résoudre

ont conduit à décomposer l'acte de conception en 3 composantes ou problèmes :

- Problème ARCHITECTURAL.
- - ECONOMIQUE.
- - TECHNIQUE.

a- Le problème architectural :

L'esquisse architecturale est élaborée par l'architecte à partir du plan de masse. Le bâtiment à ce niveau est décrit d'une manière sommaire et décomposé en étages, logements, cellules...

Les informations à gérer sont très diverses et leur organisation est l'un des problèmes majeur; en effet la majorité des informations utilisées par les autres tâches du projet proviennent directement de l'esquisse architecturale.

b- Le problème économique :

Bien souvent, les contraintes économiques sont de nature à influencer le choix d'une variante. Les solutions techniquement admissibles peuvent être en conflit avec le budget du maître d'oeuvre et le coût d'objectif.

c- Le problème technique :

La composante technique n'est pas de nature unique; différents spécialistes interviennent à ce niveau, et chacun doit résoudre des problèmes liés à une fonctionnalité bien précise du bâtiment. Cette composante peut être décomposé en plusieurs composantes :

- STRUCTURE (superstructure et équipements..)
- ISOLATION (thermique et acoustique)
- INFRASTRUCTURE (fondations et V.R.D)

Les visions techniques du bâtiment

a- Les partis techniques :

Le bâtiment d'un point de vue technique peut être décomposé en 3 fonctions (ou 3 systèmes), cette décomposition est utilisée par les prototypes ETEA, X2A [9-ETEA] [10-DUFAU] :

- . La superstructure : c'est la partie du bâtiment composée d'éléments verticaux et horizontaux. Ces éléments ont une fonction porteuse mais aussi une fonction de séparateur avec l'extérieur. A ces éléments, il faut ajouter les

équipements intérieurs du bâtiment. Signalons que ces éléments horizontaux et verticaux participent aussi à l'isolation thermique du bâtiment.

. L'isolation et les équipements thermiques et acoustiques :

cette fonction concerne l'isolation thermique et acoustique du bâtiment assurée par des matériaux d'isolation et un système de chauffage. Le choix des différents éléments participant à l'isolation relève du respect de la réglementation qui impose un calcul des déperditions au niveau de chaque logement.

- . L'infrastructure : c'est principalement la partie du bâtiment qui transmet la charge en provenance de la superstructure vers "le bon sol" pour assurer la stabilité de l'ensemble - partie dite "système de fondation" -, mais c'est aussi l'ensemble des éléments servant à lier le bâtiment avec son environnement et qui se traduisent par des raccordements (réseaux, voiries...) - ensemble dit réseaux -. (Le système de fondation est composé d'éléments ponctuels (semelles, pieux) d'éléments linéaires (filantes, long-rines), et d'éléments surfaciques (radier partiel ou général).

b- Les relations entre partis :

Lors du processus de conception, en phase d'études primaire ou secondaire, le choix fait sur chaque composante fige pratiquement la solution retenue. Il est bien évident, par exemple, que l'adoption d'une esquisse architecturale aura des conséquences économiques et techniques.

La décomposition du bâtiment au point de vue technique par spécialité ne doit pas être comprise comme une liberté totale qu'aurait chaque intervenant dans le choix d'une solution. Ces choix techniques sont aussi inter-dépendants à ce stade du processus de conception. Les principales relations d'inter-dépendances ont été développées par [3-BOISSIER] [6-MIRAMOND] [8-DUFAU] :

- . Thermique-Structure.
- . Fondation-Structure.
- . Fondation-thermique.

1.1.3- L'étude de l'infrastructure

L'étude de l'infrastructure peut se diviser en 3 phases successives :

- Etude préliminaire :

Cette étude détermine le système de fondation ; aussi elle est tributaire de la qualité de la campagne de sondages réalisés et bien sûr du dépouillement de ces sondages. Il faut être d'autant plus prudent que les charges sont importantes, afin de pouvoir construire avec le maximum de sécurité et d'économie.

- L'avant-projet :

Cette phase concerne la constitution du dossier d'appel d'offres. Il comporte la réalisation des plans et des notes de calculs pour le système de fondation, ainsi que les études pour le dallage et les réseaux [2-BAYON]. Cette phase peut être schématisée ainsi -fig 2-

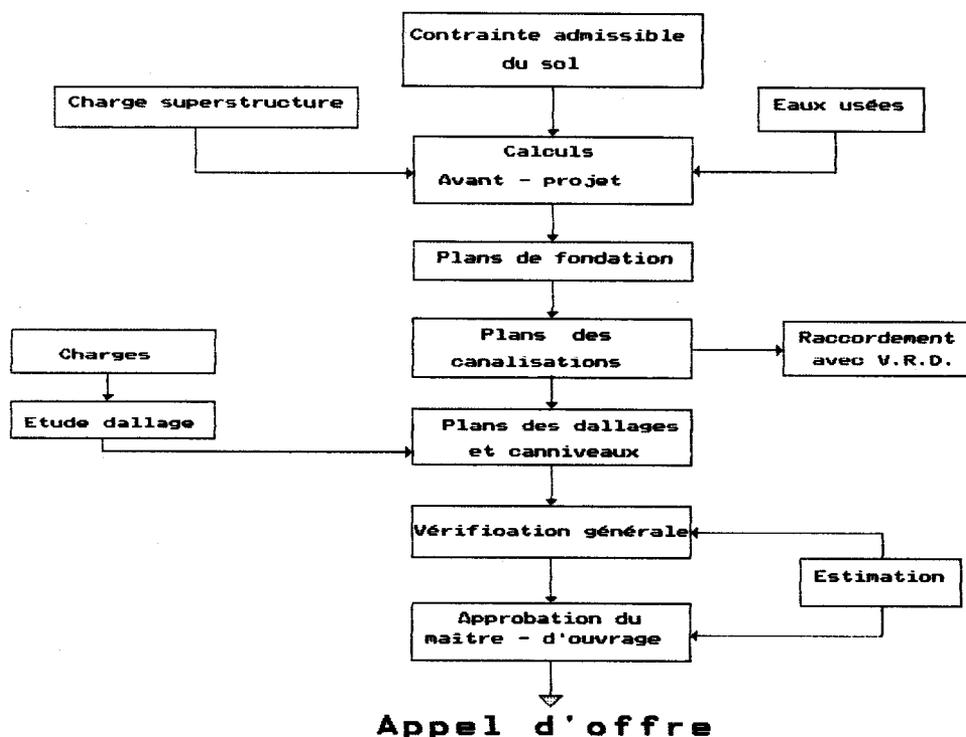


fig 2- Eléments d'étude de l'infrastructure.

- Les études d'exécution :

Ce sont la mise au point des plans de synthèse et la fourniture des détails sur les éléments peu explicites du dossier d'appel d'offre.

Les Réseaux

Les canalisations "enterrées" dans le bâtiment ont pour rôle d'évacuer à l'extérieur les eaux provenant des toitures et des installations sanitaires. Elles sont réalisées enterrées dans deux cas :

- Le réseau d'égout est suffisamment profond pour permettre un écoulement gravitaire.
- Le dernier plancher bas est constitué par un dallage ou un vide sanitaire peu accessible.

Les canalisations doivent être étudiées avec les fondations car leurs incidences réciproques ne sont pas négligeables.

L'évacuation de ces eaux nécessite la réalisation de plusieurs réseaux :

. Le réseau d'eaux pluviales : il ne reçoit que les eaux pluviales, évacué directement dans l'égout ou dans le milieu naturel.

. Le réseau des eaux usées : il reçoit les eaux polluées et les rejette dans l'égout avec si nécessaire passage dans une unité de traitement.

Ces réseaux sont repris à l'extérieur du bâtiment par le lot assainissement qui leur fait franchir la distance entre bâtiment et l'égout situé sous la voie publique. Ce problème de raccordement avec les réseaux existants fait l'objet d'un travail de recherche au laboratoire [11-BEZZAZI] .

Le système de fondation :

L'étude des fondations lors du projet est un problème assez complexe pour le concepteur. La difficulté du choix du système provient essentiellement de :

- La nécessité d'une décision tôt dans le processus de conception en présence d'informations incertaines (ou floues) et en l'absence d'autres informations.

- L'absence de règlements stricts : le calcul et la vérification des fondations sont basés sur une directive (D.T.U) et sur le respect des règles de l'art.

Pour procéder à un choix satisfaisant du système de fondation, il faut connaître :

- Le site: pentes, voies d'accès, constructions voisines.
- La Nature du terrain : données précisées par le rapport de sondage.
- La future construction : dimensions en plan, charges verticales, efforts horizontaux, type de superstructure.
- La présence de l'eau .
- Les carrières, les zones de remblais.

- Les bâtiments voisins : qui peuvent conduire à des reprises en sous oeuvres.
- Les contraintes dues à la réglementation et au disponible pour l'étude et pour la réalisation.
- Le " montant alloué " pour cette partie du bâtiment.

Le coût des fondations étant peu compressible, une fois le système choisi, le projetteur doit prendre le minimum de risques dans la conception et limiter les difficultés de réalisation. Le problème technique n'est pas simple et sa solution n'est pas toujours évidente.

(L'étude des fondations courantes fait l'objet du présent mémoire, l'analyse du problème est détaillé dans le deuxième chapitre.

CONCLUSION :

Alors que les matériaux constituant les parties en élévation (maçonneries porteuse, grandes ossature en béton armé ou autres ...) sont, dans la grande majorité des cas, connus d'une façon satisfaisante permettant de calculer les diverses structures et de les réaliser avec un degré de sécurité convenable, il n'en est pas de même pour le sol sur lequel les ouvrages doivent trouver un appui par l'intermédiaire de leurs fondations.

Nous avons présenté les problèmes qui se posent dans le cadre du projet que nous venons de définir et l'importance de l'étude de l'infrastructure. Nous précisons au paragraphe suivant les problèmes liés à la conception de l'infrastructure.

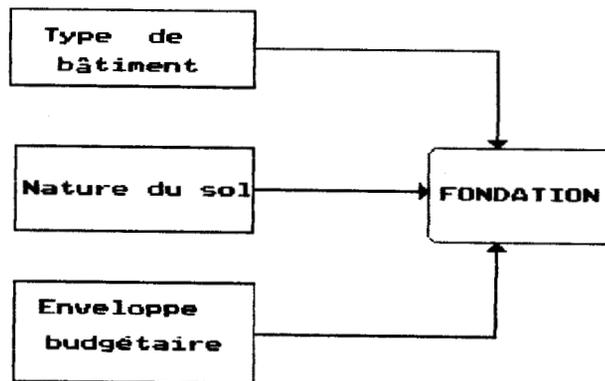
1.2- L'objet de l'étude.

L'étude des fondations de constructions, qu'il s'agisse d'immeubles d'habitation ou de bâtiments lourds présente une importance d'autant plus grande que les charges à prendre en compte dans les projets ne cessent d'augmenter.

L'idée de bâtir tient rarement compte de la nature du sous-sol [12-DERAMPE].

Le choix de la fondation d'un ouvrage est loin d'être arbitraire : il est conditionné par des considérations techniques et économiques. L'étude de la stabilité et le tassement à la mise en charge dépend de la nature du sol au droit et au voisinage de l'ouvrage. L'étude économique dépend de l'enveloppe budgétaire programmée par le maître d'ouvrage (fig 3)

fig 3- Eléments de l'étude des fondations.



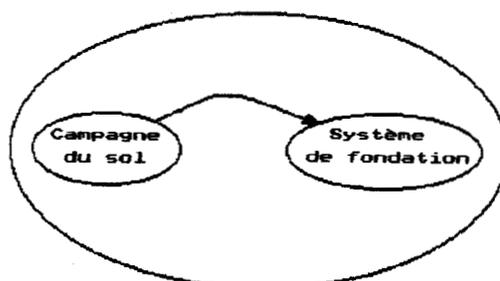
Il est rare que la connaissance superficielle du terrain soit suffisante pour résoudre ce problème. Il faut savoir ce qui existe en profondeur : nature des différentes couches géologiques, présence de l'eau ... (enquête préalable).

La connaissance de la coupe géologique du terrain ne donne pas par elle même, les caractéristiques mécaniques de diverses couches rencontrées, caractéristiques nécessaires pour l'étude des fondations. D'où la nécessité de déterminer ces caractéristiques en réalisant des essais in-situ et/ou en laboratoire.

Deux composantes principales apparaissent donc, dans l'étude des fondations :

- La CAMPAGNE du SOL.
- Le SYSTEME de FONDATION.

fig 4- Le problème global.



1.2.1- La reconnaissance du sol

Les phases de la reconnaissance :

Dans une étude citée par [13-PUTTATI], il semble que 3/4 des sinistres proviennent de 2 causes principales : absence de reconnaissance du sol et mauvaise interprétation des résultats de sondage d'essais.

Cette campagne de reconnaissance se compose de :

- Une enquête préalable.
- Une campagne d'essais.
- campagnes complémentaires.

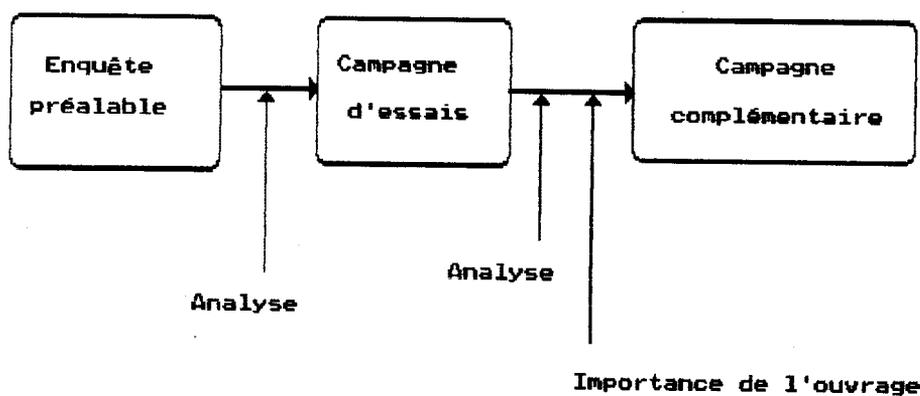


fig 5- Processus d'exécution de la campagne de sol.

1- La phase d'enquête préalable :

Lorsqu'un ouvrage est projeté dans un site donné, il convient, tout d'abord de procurer le plus de renseignements possibles auprès des maîtres d'oeuvre ayant déjà réalisé des fondations à une distance pas trop éloignée.

La reconnaissance visuelle et la recherche de documents (cartes, études sur des terrains voisins) permettront de préciser la topographie du sol, les problèmes liés aux eaux.

Cette phase, si elle fournit des indications générales fort intéressantes, ne peut, sauf rares exceptions, donner suffisamment d'enseignements pour résoudre complètement le problème .

2- La campagne d'essais :

Les résultats de l'enquête préalable permettent de définir une campagne de reconnaissance qui doit être effectuée en une ou plusieurs phases.

Il existe actuellement un système expert -CESSOL- [14] qui aide à la définition d'une campagne d'essais en prenant en compte l'importance de l'ouvrage à construire et la nature des couches de fondation. Ce système procède à une élimination des essais inutiles ou non traversants et ensuite à plusieurs opérations:

- un calcul des profondeurs de reconnaissances selon plusieurs critères ,
- une recherche des essais nécessaires pour le calcul de la portance et du tassement,
- une recherche des essais nécessaires pour le calcul de la stabilité des fouilles,
- ...

Ce système est actuellement sur le marché, et semble répondre au problème de la définition d'une campagne d'essais.

Cette étape de reconnaissance est très importante car c'est d'elle que proviennent les informations sur le sol qui permettront de faire un choix de système de fondation et d'en vérifier les différents éléments .

3- La campagne complémentaire :

Cette campagne peut être lancée à tout moment, depuis la réalisation de la campagne d'essais jusqu'à l'ouverture des fouilles. Son objectif est d'éclaircir certains points laissés obscurs par la campagne.

Restriction à notre étude :

Nous avons exposé les différentes étapes de la reconnaissance de sol. Nous nous limitons dans cette étude à la campagne d'essais ,celle qui permet la réalisation des évaluations techniques (Portance/Tassement).

Deux possibilités sont alors envisagées :

a- La campagne n'a pas été réalisée :

Nous proposons une profondeur de reconnaissance et une liste d'essais recommandés et d'essais impossibles à réalisés (ou inutiles).

b- La campagne a été réalisée :

Nous vérifions, dans ce cas, certaines règles concernant :

- . La conformité des essais réalisés dans les différentes couches rencontrées en profondeur.

- . La profondeur de reconnaissance par comparaison avec la profondeur projetée pour la fondation.

Examinons les conséquences des 2 points cités sur la suite du projet:

* Le type de l'essai réalisé :

Selon le type de vérification envisagé (portance ou tassement) à partir d'un essai donné, nous analysons le problème en terme de sécurité et de fiabilité de l'évaluation. Certains essais ne sont pas adaptés à certains types de sol; par exemple, les résultats d'un essai triaxial dans un sol composé de sable argileux est très contesté : l'interprétation de ces résultats est à faire avec beaucoup de précautions... Les conséquences de cette règle (pour cet exemple) seront traduites par une attitude du décideur très critique vis à vis de la valeur de la portance calculée à partir des résultats d'essai obtenus dans ces conditions.

* La profondeur de reconnaissance :

Il s'agit de comparer la profondeur de la reconnaissance réalisée avec la profondeur minimale nécessaire pour que les évaluations de la portance, de l'amortissement des contraintes (tassement absolu) et du tassement différentiel soient faites avec le maximum de fiabilité. Si cette profondeur minimale n'est pas atteinte, cela se traduit, ici aussi, par une confiance moindre attachée à ces évaluations; il faudra prendre en compte ce phénomène dans les procédures de choix d'une variante parmi plusieurs possibles.

Remarque : la campagne complémentaire peut intervenir même après l'ouverture des fouilles et donc en phase de réalisation; sa prise en compte semble très difficile dans notre étude où l'objet est en cours de conception.

1.2.2- Le traitement du système de fondation

De la proposition initiale à la solution

Le choix d'un système de fondation est à faire en fonction du bâtiment et du sol. La campagne de reconnaissance est les essais réalisés permettent de reconnaître les caractéristiques mécaniques et physiques des diverses couches géologiques sous l'ouvrage à supporter.

Le projeteur fait alors une (ou plusieurs) proposition(s)

d'un système de fondation : cette proposition est faite généralement sous forme de recommandation d'un type de fondation et d'élimination d'autres types (recommandation d'un radier si le sol semble compressible et si la descente de charge estimée est trop importante pour utiliser des semelles isolées ou filantes).

Cette proposition représente le point d'entrée dans notre système ; un affinement de cette proposition sur la base d'une évaluation technique et économique est alors possible. Cet affinement peut être décomposé en sous-problèmes :

- . Prédimensionnement des éléments de fondation et choix des éléments de liaison,
- . Vérification ponctuelle des éléments de fondation,
- . Technique de mise en oeuvre (pour les fondations profondes).
- . Constat global du système retenu.

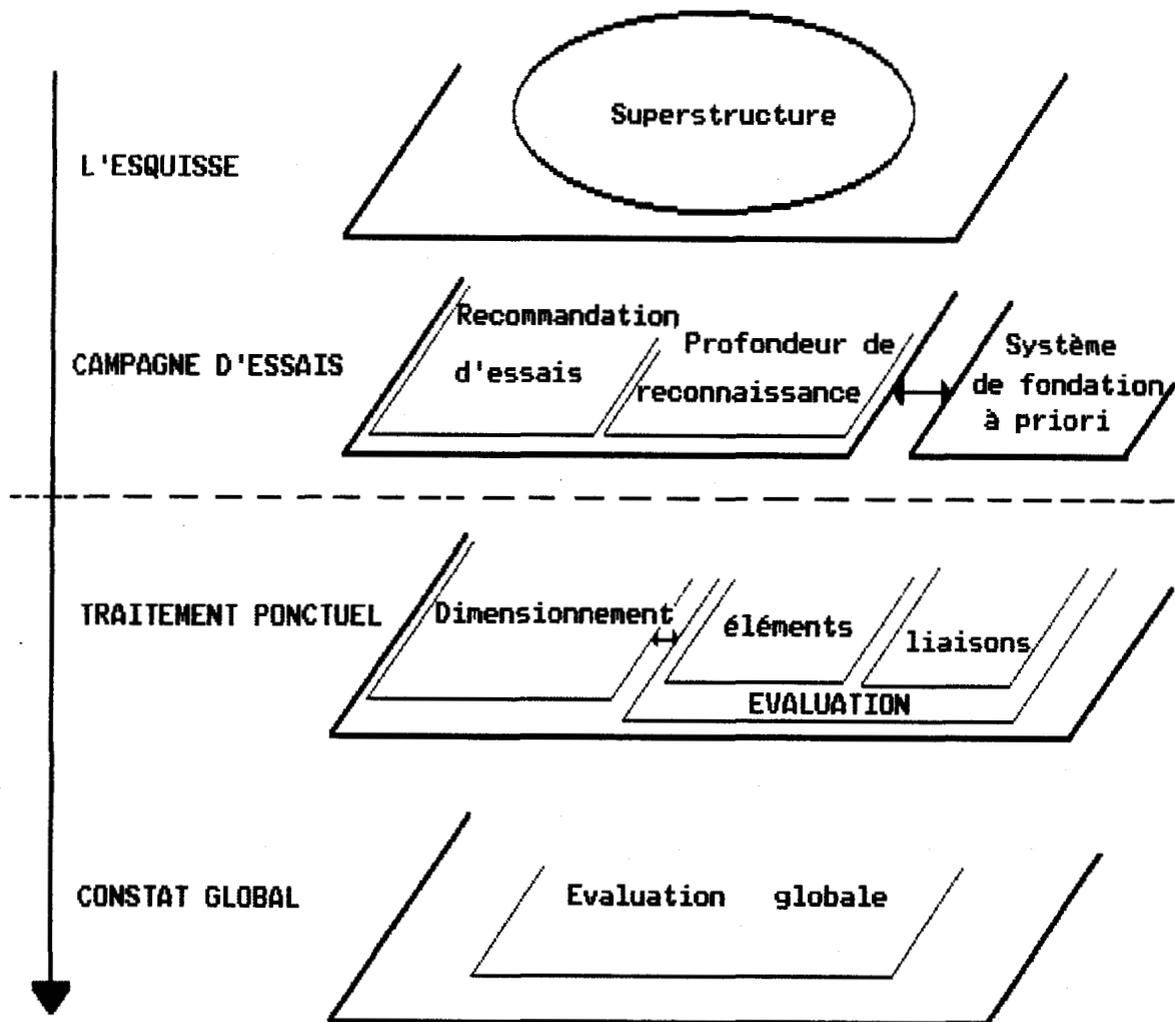
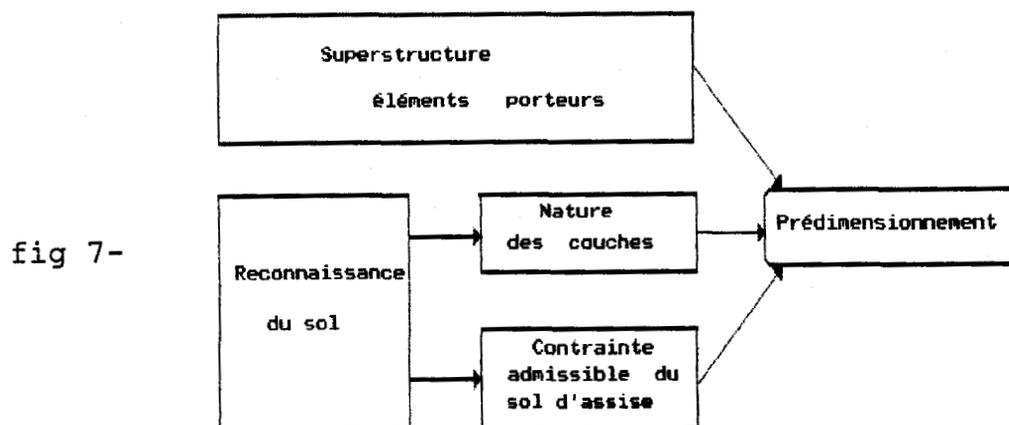


fig 6- Les sous-problèmes rencontrés lors de l'étude des fondations.

Le prédimensionnement :

Partant de la reconnaissance du sol, le concepteur a une idée de la valeur maximale à ne pas dépasser. La connaissance de cette pression limite et des informations provenant de la superstructure nous permettent de réaliser un prédimensionnement des différents éléments de fondation (fig 7).



Ces dimensions peuvent être remises en cause après évaluation ou suite à une homogénéisation globale du système de fondation retenue.

La génération automatique des éléments de fondation sous les éléments porteurs de la superstructure fait l'objet d'un travail de recherche au laboratoire de Génie Civil et Habitat (L.G.C.H) à Chambéry [15-HABEJ-BEK]. La présence d'un schéma conceptuel unique pour tous les intervenants dans le système X2A [10-DUFAU] permet une génération des différents éléments du système de fondation en cohérence avec la structure du bâtiment.

Evaluation ponctuelle des éléments :

Cette évaluation, suppose la connaissance des caractéristiques mécaniques du sol de fondation, suite à la réalisation d'un ou plusieurs essais en laboratoire ou in-situ. Elle consiste à une évaluation de la stabilité (portance) et du tassement des éléments en vue de dégager un constat global de l'ensemble.

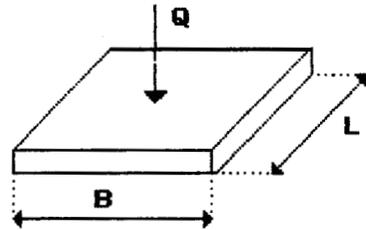
Une optimisation partielle des dimensions des éléments est alors possible, et qui aura pour conséquence la modification des dimensions proposées auparavant. Le principe est de laisser le libre choix au décideur dans la modification.

Concernant le poinçonnement, le principe retenu ici est de comparer la pression transmise par le bâtiment (q_{app}) à la capacité portante du sol (q_d) par calcul du rapport (F_{port}) : ce rapport représente un coefficient de sécurité relatif à la portance du sol sous la fondation

Suivant que l'élément traité est ponctuel, linéaire ou surfacique l'action transmise est exprimée en KN,/ml, KN/m²

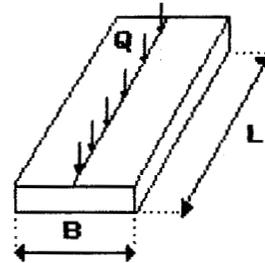
Elément ponctuel superficiel ou semi-profond

$$F_{port} = \frac{q_d}{(Q/B.L)}$$



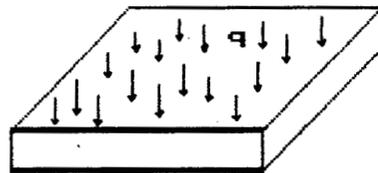
Elément linéaire (filant)

$$F_{port} = \frac{q_d}{(Q/B)}$$



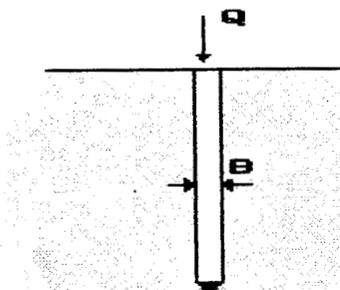
Elément surfacique (radier)

$$F_{port} = \frac{q_d}{q}$$



Elément ponctuel profond

$$F_{port} = \frac{Q_f + \frac{Q_D}{\pi \cdot B^2 / 4}}{Q}$$



Concernant le tassement, le principe retenu est de comparer le tassement absolu de chaque élément au tassement admissible, par calcul du rapport :

$$F_{\text{tass}} = \frac{W_{\text{adm}}}{W_{\text{cal}}}$$

où

W_{cal} = tassement calculé.

W_{adm} = tassement admissible.

Les valeurs admissibles du tassement total varient d'un auteur à un autre mais d'une manière générale, on peut admettre les valeurs suivantes [16-OLIVARI] [17-PHILIPPONNAT] :

- 2 - 5 cm pour les murs en maçonnerie.
- 5 - 10 cm pour les poutres.
- 8 - 20 cm ou plus pour les radiers.

Le tassement différentiel est évalué pour 2 éléments voisins et doit être limité à :

- L/1000 - L/2000 : pour les murs en briques.
- L/500 - L/250 : pour les poutres en B.A.
- de l'ordre de L/300 : pour les voiles en B.A.

où L représente la distance entre 2 poteaux voisins ou entre 2 points soumis au tassement différentiel.

Technique de mise en oeuvre :

Ce traitement concerne surtout les fondations profondes; Le mode d'exécution est un élément économique important, c'est aussi un facteur à considérer lors de l'évaluation technique.

Une étude comparative des solutions avec différents modes d'exécution est alors proposée.

Constat global du système de fondation :

Ce constat concerne le système de fondation pris dans sa globalité; Il consiste à faire une standardisation des différents éléments du projet, d'étudier certaines règles technologiques de constructibilité et l'influence du tassement différentiel.

Le principe retenu est d'avoir une profondeur d'assise unique, à chaque fois que c'est possible, pour les différents éléments de fondation ainsi que des éléments de dimensions standards : il n'est pas question de choisir des éléments très différents les uns des autres, cette solution est souvent écartée pour des raisons économiques.

Une fois que le système de fondation est retenu , nous procédons au calcul du coût de l'opération pour les différents postes :

- Volume du BETON.
- Poids d'ACIER.
- Surface de COFFRAGE.
- Volume de FOUILLE.
- Surface du béton de PROPLETE.

pour les fondations superficielles [15-HABEJ-BEK], et un coût forfaitaire estimé au mètre linéaire de fondation profonde (fourniture, exécution...).

1.2.3- Le choix d'un système de fondation :

Nous avons exposé au paragraphe précédent, les problèmes qui se posent dans la conception des fondations d'un projet de bâtiment. Les informations dont on a besoin proviennent essentiellement du bâti et du sol.

Depuis l'enquête préalable jusqu'à la proposition d'un système de fondation "a priori", les interactions entre ces trois intervenants (Sol, Bâti, Structure) -Fig 8- sont très fortes et peuvent conditionner ce choix.

. SOL-FONDATION :

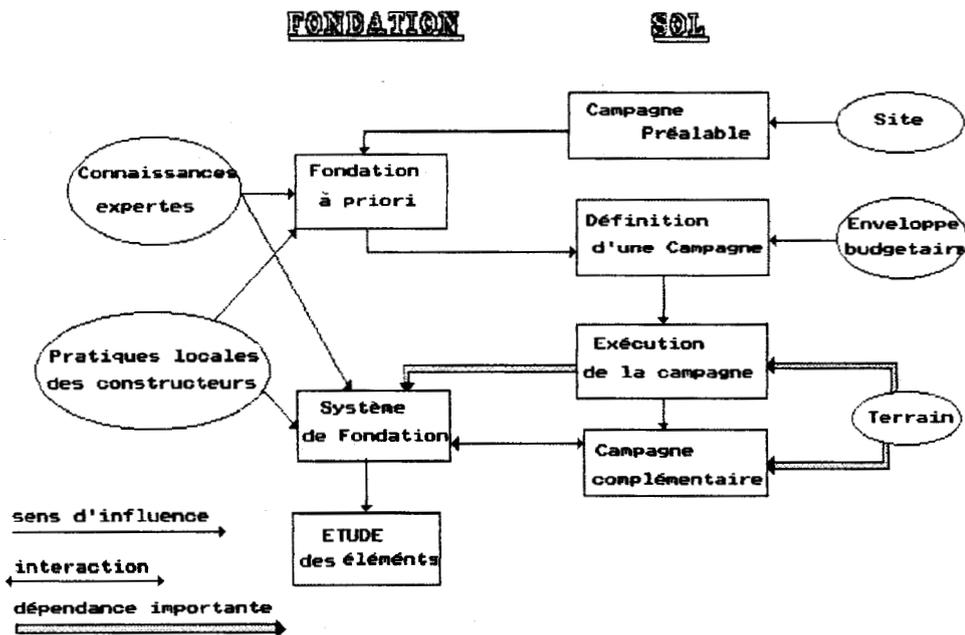


fig 8- Interaction SOL-FONDATION.

. SOL-SUPERSTRUCTURE :

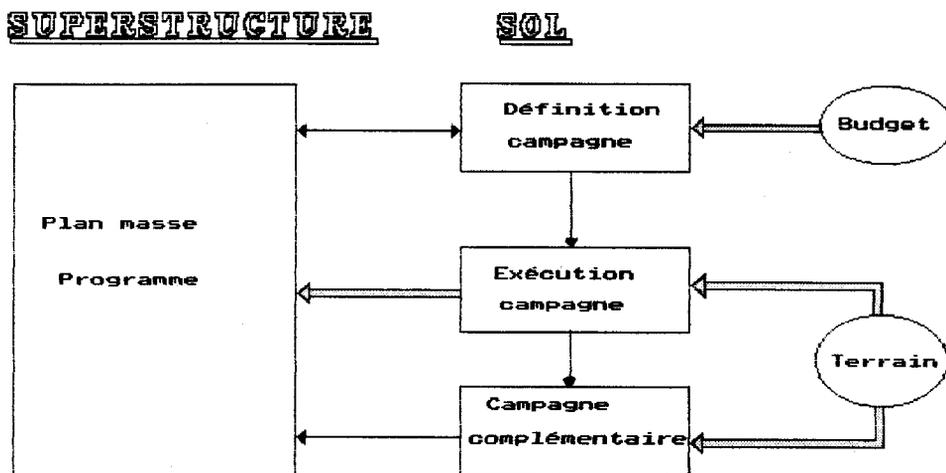


fig 9- Interaction SOL-BATI.

. FONDATION-SUPERSTRUCTURE :

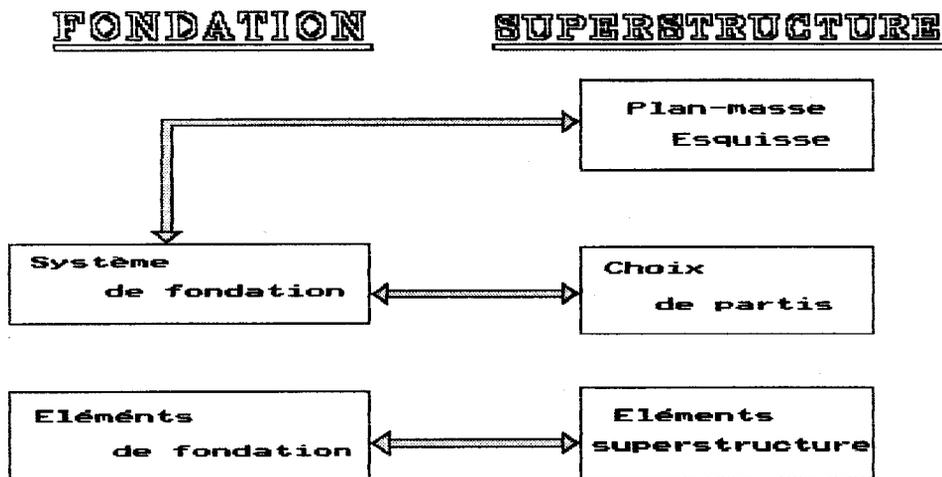


fig 10- Interaction FONDATION-BATI

Suite à une étude du comportement local et global des éléments de fondation, le décideur fait intervenir des critères de sécurité et un critère économique en vue de faire une sélection entre différentes variantes possibles. Regardons en détails ces différents critères :

1.2.3.1- Le critère économique :

Ce critère intervient tout au long du processus de conception. La précision des évaluations économiques croît avec l'avancement dans le processus de conception, mais le concepteur a besoin de chiffrer le coût de la construction très tôt dans le processus. L'étude de ce critère est limitée à une évaluation par "ratios" aux premières phases de conception où les données nécessaires ne sont connues, à ce niveau, qu'avec incertitudes et donc une étude plus détaillée (ou plus exacte) ne représente aucun intérêt.

L'étude par métré correspond à une phase plus avancée dans le processus de conception, soit pour comparer des solutions "techniquement admissibles", soit pour calculer le coût de l'opération.

Les éléments de l'évaluation économique :

Le budget réservé au poste "adaptation au sol" est très variable (de 5 à 30%) mais assez important dans tout les cas.

L'évaluation nécessite la connaissance des quantités suivantes : béton, acier, coffrage, fouille, mais aussi l'attribution à ces quantités des prix unitaires. Deux méthodes sont proposées à l'utilisateur : une méthode par ratios, et une méthode par quantitatif (Avant-métré) -fig 11-.

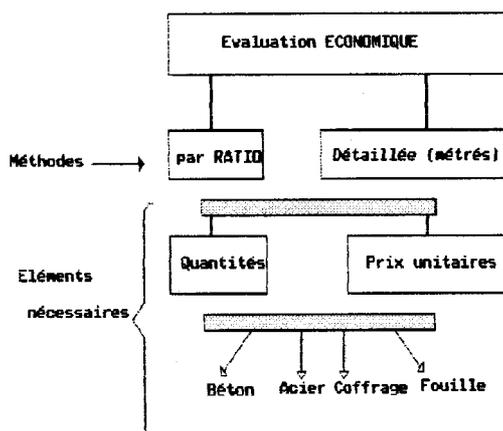


fig 11- Eléments de l'évaluation économique.

Rappelons que le choix d'une méthode d'évaluation dépend de l'état d'avancement du projet, et donc de sa place dans le niveau de conception. Il est évident que si les dimensions d'une semelle n'ont pas été confirmées par une vérification technique, une évaluation par métré ne représente aucun intérêt.

Prise en compte du critère économique :

Le double rôle de l'évaluation économique est de comparer le coût du projet au coût de l'objectif fixé, mais aussi d'aider à la sélection entre plusieurs variantes. Le choix étant toujours relatif, notre but est de donner au décideur des éléments nécessaires à la sélection des variantes.

Ce critère est plus ou moins important, selon l'importance des travaux à réaliser. Le coût de la campagne d'essais n'est pas pris en compte dans le cadre de cette étude (possibilité d'introduction d'une valeur forfaitaire), mais la qualité de cette campagne sera prise en considération dans la méthodologie de sélection proposée plus loin.

1.2.3.2- Les critères de sécurité :

L'étude de ces critères se traduit par une évaluation des coefficients de sécurité vis-à-vis de la stabilité et du tassement de l'ouvrage, en respectant la réglementation et quelques règles de l'art.

Les éléments de l'évaluation technique :

L'étude de l'évaluation technique concerne la stabilité (PORTANCE), et le tassement. Cette évaluation dépend du type des fondations :

a- Fondations superficielles :

Le nouveau D.T.U 13.12 [18] précise les méthodes de calculs de la valeur ultime (q_u) de la réaction du sol ainsi que la contrainte de calcul (q) (à ne pas confondre avec la contrainte admissible développée dans le D.T.U 13.1 [19]). La contrainte de calcul (q) est la plus petite des 2 valeurs: $q_u/2$ et celle qui dispense de tenir compte des tassements différentiels dans la structure. Ceci revient à comparer la valeur $q_u/2$ à la contrainte appliquée sur la fondation (E.L.U.R) et de vérifier que le tassement différentiel (maxi) n'excède pas une certaine valeur limite (1/500 de la portée ...).

Il s'agit donc de dégager un rapport de la contrainte (q_u) sur la contrainte appliquée et qui doit être, dans tous les cas, supérieur à 2 (Stabilité). L'utilisation de la contrainte admissible revient à vérifier que le rapport de la portance sur la contrainte appliquée (contrainte de service) est de l'ordre de 3 : valeur habituellement admise (vérification retenue).

En ce qui concerne le tassement, nous calculons le tassement absolu des fondations sous l'action en E.L.S [18] [19], et le tassement différentiel (maximal) qui ne doit pas excéder les valeurs admissibles.

b- Fondations profondes :

Le calcul des fondations profondes est régi par le D.T.U 13.2 [20]. Ce texte donne un certain nombre d'indications relatives :

- . à la fourniture et la mise en oeuvre des matériaux.
- . à l'exécution des travaux annexes (recépage, semelles, longrines de redressement, de liaison...).
- . à l'implantation et au piquetage.

Il fixe aussi des essais de contrôle et d'information et indique certaines méthodes de calcul de la "capacité nominale".

Les D.T.U présentent au concepteur un cadre de travail et non des méthodes de calcul strictes (comme c'est le cas pour le calcul des poutres et dalles ...). Les règles proposées ne correspondent pas toujours aux problèmes rencontrés, surtout en ce qui concerne la nature du sol, Bien souvent, on a pris l'hypothèse des sols homogènes, où de faible hétérogénéité.

Les éléments d'incertitudes :

La notion de sécurité est liée d'une manière directe à l'incertitude. Les éléments nécessaires à l'étude d'un projet de fondation sont toujours acquis avec incertitude. Ces incertitudes peuvent être classées selon leur provenances -fig 12- dans le processus de conception du système de fondation :

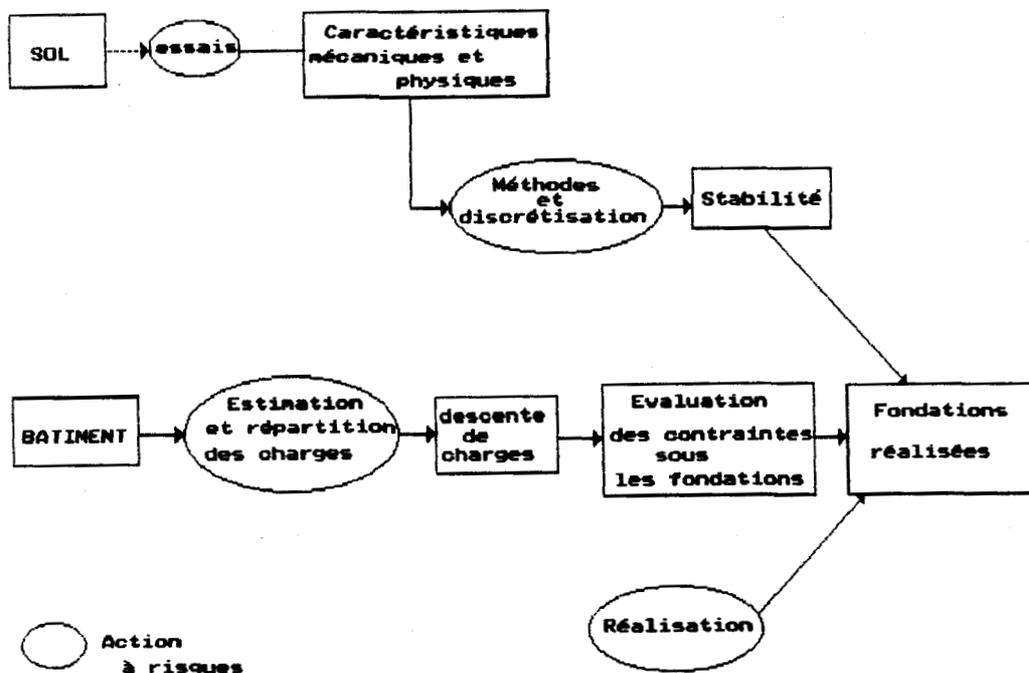


fig 12- Les principales sources d'incertitudes dans la conception d'un projet de fondation.

a- Incertitudes sur les caractéristiques du sol :

Elles sont dues à la précision de l'appareil de mesure, mais aussi à l'hétérogénéité du sol vis à vis de ce paramètre. BOISSIER [3] a étudié ce problème et a proposé quelques ordres de grandeur de ces incertitudes :

GAMMA : de 3 à 5%
PHI : de 5 à 20%
C : de 10 à 50% ...etc.

b- Incertitudes sur les actions :

Ces incertitudes sont relatives aux actions en provenance de la superstructure (Charges d'exploitation, Charges climatiques...), et les actions relatives aux poids des terres, à l'eau, au frottement négatif des pieux dans certains cas...

Les causes d'incertitude ont fait l'objet de plusieurs travaux (BORGES [21], etc...).

c- Incertitudes sur les méthodes :

Les méthodes de vérification sont basées sur des observations empiriques ou des modèles théoriques dont les hypothèses sont très précises. Ce problème a été étudié par plusieurs auteurs : CORNELL [22], ANG et ELLINGWOOD [23], etc...

Par exemple, le coefficient N_q est donné par plusieurs auteurs :

Pour $\phi=30^\circ$	TERZAGHI : $N_q = 28$
	MEYERHOFF: 60
	DE-BEER : 160
	CAQUOT et
	KERIZEL : 54

d- Incertitudes sur les dimensions :

Elles proviennent essentiellement de la mise en oeuvre. Les dimensions à l'exécution d'une fondation superficielle (par exemple), ne sont jamais les mêmes (réglage des fouilles) que celles prévues par le concepteur.

Ce même problème se pose pour la profondeur d'ancrage des pieux, pour le bétonnage des puits...

1.2.3.3- Le choix :

Le problème posé :

Nous avons observé la manière de travailler de plusieurs bureaux de sols; Cette observation fait apparaître que les concepteurs procèdent à une évaluation technique sommaire (rapide) de différents types de fondations en commençant toujours par une solution par fondation superficielle (si le terrain semble le permettre). Le nombre de variantes possibles est, à ce niveau, assez limité. Les résultats de l'étude technique et économique dégagent une solution "à priori" mais qui est à étudier en détails.

Le décideur est confronté alors au problème de choix des différents éléments de son système de fondation : Faut-il augmenter la profondeur d'ancrage ou la section de la base de la fondation ? Les conséquences de ce choix sont liées directement à la notion de sécurité et au coût de l'opération (fig 13); Ces deux critères sont les éléments principaux de l'acte de décision.

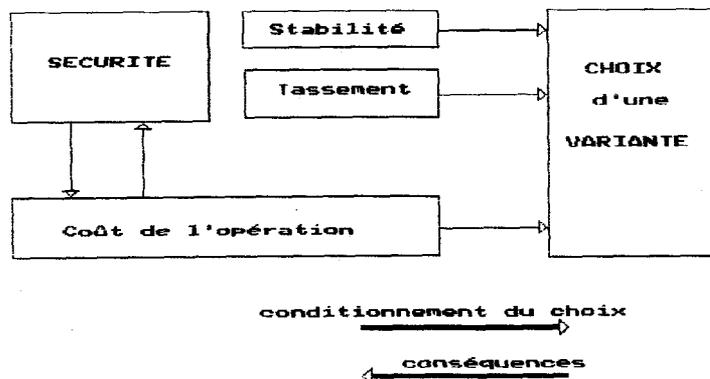


fig 13- Environnement de la décision.

Le problème peut être formulé ainsi :

┌ Comment tenir compte de l'incertitude sur les évaluations dans l'acte de choix, parmi plusieurs variantes, de la solution qui assure le mieux la sécurité et qui soit la moins coûteuse. └

Le concept flou de la vérification :

Nous ne nous intéressons pas, dans le cadre de cette étude, à l'étude des incertitudes et de leurs conséquences sur les évaluations de la portance et du tassement des éléments de fondation. Nous supposons donc, que le concepteur a déjà une idée de l'incertitude attachée à la portance et au tassement. En d'autres termes, le décideur doit pouvoir formuler les valeurs

des évaluations d'une manière floue : la portance est comprise entre 200 Kpa et 250 Kpa ,par exemple. Ceci se traduit par une modulation des coefficients de sécurité déjà définis.

Il est bien clair que cette formulation dépend des incertitudes, attachées à chaque évaluation, qui dépendent, elles mêmes, de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la nature du sol, la qualité de la reconnaissance du sol.

a- Retour à la campagne du sol :

La campagne du sol qui, entre autre, dégage des caractéristiques mécaniques du sol nécessaires aux évaluations techniques, représente un élément important de la fiabilité qu'on peut accorder à une évaluation. Le problème de reconnaissance est composé de 2 sous-problèmes et qui sont liés à :

- . La position (dans le plan) du sondage par rapport à la position des éléments de fondation.
- . La profondeur minimale de reconnaissance (I-4), comparée à la profondeur de reconnaissance de la campagne.

Nous fournissons au décideur la valeur de la profondeur de reconnaissance nécessaire pour aborder les évaluations de la portance et du tassement avec relative confiance.

b- Nature de l'essai réalisé :

Nous vérifions la compatibilité entre le sol rencontré et l'essai réalisé. Un ensemble de règles ont été mis en place pour vérifier la cohérence essai-sol. Les essais ont été classés en 3 types :

- . Essai non recommandé.)
- . - possible.
- . - recommandé.

c- Sélection des variantes :

Le décideur exprime son souhait vis-à-vis de chaque critère, et définit donc un objectif global. La méthode utilisée pour le classement des variantes est une méthode basée sur la théorie des ensembles flous qui sera développée dans le deuxième chapitre.

CONCLUSION :

Nous avons exposé dans ce paragraphe les étapes de la conception d'un système de fondation. Nous avons identifié les problèmes qui se posent dans cette étude et les réponses qu'il faudra donner pour aider au choix d'un système de fondation; nous nous sommes intéressés à l'évaluation technique et économique d'une proposition d'un système de fondation et au classement multicritère des différentes variantes. De plus il apparaît fondamental de prendre en compte le caractère flou de certains paramètres car de nombreuses informations nécessaires sont connues, à ce niveau de conception, avec grande incertitude.

2- La C.A.O et l'approche multicritère.

Nous avons exposé dans le premier chapitre, les difficultés rencontrées lors de la conception d'un système de fondation et les problèmes liés au choix de variantes. |

le cadre de la décision

La réglementation des projets de construction impose au concepteur la satisfaction de certains critères essentiels par sa proposition.

Le projet "bâtiment" doit remplir des fonctions spécifiques dépendant du niveau de conception dans lequel on se trouve.

Comme pour de nombreux produits, c'est le meilleur rapport "qualité-prix", qui est recherché dans un projet de construction de bâtiment.)

la pratique de décision

Le projecteur construit un certain nombre de propositions et les évalue. |

Ensuite, ayant précisé des objectifs à atteindre, il procède à une agrégation (parfois subjective) des critères dans le but de dégager une solution dite "optimale".

Enfin, après élimination des variantes inadaptées ou n'entrant pas dans le cadre budgétaire, il se heurte au classement des propositions restantes. |

les problèmes

Quatre problèmes se posent alors :

- 1- Comment générer des solutions à comparer.
- 2- Comment évaluer les performances des objets vis à vis de chaque critère pris isolément.
- 3- Comment définir la qualité globale d'un projet ?
- 4- Quelle méthode utiliser pour le classement des solutions techniquement admissibles ?

Des réponses aux deux premiers problèmes par l'approche C.A.O. vont être présentées au premier paragraphe.

Des réponses aux deux autres problèmes par l'approche multicritère en présence d'information floue vont être présentées au deuxième paragraphe.

2.1- Le projet bâtiment et l'outil C.A.O

La décomposition du projet "bâtiment" développé au chapitre 1, en différentes composantes manipulées, chacune, par un spécialiste et la dépendance des choix lors des phases préliminaires d'études montrent la nécessité d'une analyse globale de l'objet à réaliser.

Cette approche est de plus directement liée à une vision économique du projet (coût d'objectif); en effet, les délais deviennent de plus en plus serrés et la qualité de la construction est plus que jamais recherchée.

L'analyse globale du projet de bâtiment à travers une description unique rend nécessaire [24-GUENA] [25-LEININGER] :

- La manipulation d'une grande quantité de données très diverses.
- La gestion et le stockage de ces données pour des utilisations diverses pour les différents intervenants dans les différentes phases du processus de conception.
- La transparence de la structure de l'information pour les différents concepteurs.

Les aides informatiques et notamment les systèmes de C.A.O., par les outils d'aide à la gestion des informations et les outils d'aide à la visualisation des différents éléments du projet offrent des réponses à cette nécessité d'une description unique.

2.1.1- Représentation et structuration des données.

a- Représentation unique des objets :

Il faut rappeler que le processus de conception d'un projet de bâtiment fait appel à l'intervention de plusieurs spécialistes en architecture, structure, sol, thermique, etc... et que chaque spécialiste possède ses propres outils de traitement. Dans ce cadre là, une amélioration sensible du processus de conception ne peut être atteinte que si chacun de ces outils peut acquérir les informations qui lui sont nécessaires d'un noyau commun dans une description unique du projet [26-FERRIES] [27-DUFAU].

Cette représentation unique permet à tous les acteurs intervenants dans le processus de travailler avec des informations communes cohérentes. La circulation de ces informations entre eux se trouve facilitée et, des évaluations très précoces des différentes composantes du projet sont alors possibles.

Il faut souligner le gouffre qui existe entre ce souhait de représentation unique et sa réalisation concrète acceptée par les différents partenaires.

b- La représentation des connaissances :

La description complète de l'environnement du projet de bâtiment oblige à gérer des informations très hétérogènes en forme et en provenance. Une grande partie de ces informations correspond au modèle du bâtiment en cours de conception.

Les connaissances nécessaires à la description du projet [5-QUINTRAND] peuvent être classifiées par :

- connaissances générales sur la construction.
- connaissances spécifiques au projet en cours de conception.
- un savoir faire (connaissances liées au concepteur).
- connaissances liées à l'étape de conception.

Les données qui constituent l'acquis sur le domaine d'application peuvent être regroupées dans la base de données des connaissances (B.D.C.) et celles portant sur le projet en cours d'élaboration dans la base de données du projet (B.D.P.).

Les S.G.B.D. orientés C.A.O. ont pour objectif principal de décharger l'utilisateur des problèmes de navigation dans la B.D., en lui offrant la faculté de poser des questions de façon tout à fait indépendante de l'organisation des informations.

Ceci revient à constituer des réseaux d'objets (classes d'objets) [28-CSTB] très liés entre eux et la gestion de leurs inter-relations à travers des vérifications de cohérence de ces objets.

L'utilisation de modèles de données orientés objets issues de réseaux sémantiques offre l'avantage de définir avec précision les objets constituant le bâtiment, ainsi que leurs inter-relations.

c- Architecture sommaire des systèmes de C.A.O.:

L'architecture de ces systèmes est en général organisée autour d'un noyau central mémorisant les objets manipulés ainsi que des connaissances sur leurs influences à l'intérieur de l'entité globale qu'est le bâtiment [29-AUTRAN].

Le noyau est considéré comme une banque de données au sens large ; une partie de ses données est acquise à partir d'une construction graphique du bâtiment (esquisse architecturale).

Les logiciels d'applications relatifs aux différents aspects du projet sont insérés autour de ce noyau central [27-DUFAU].

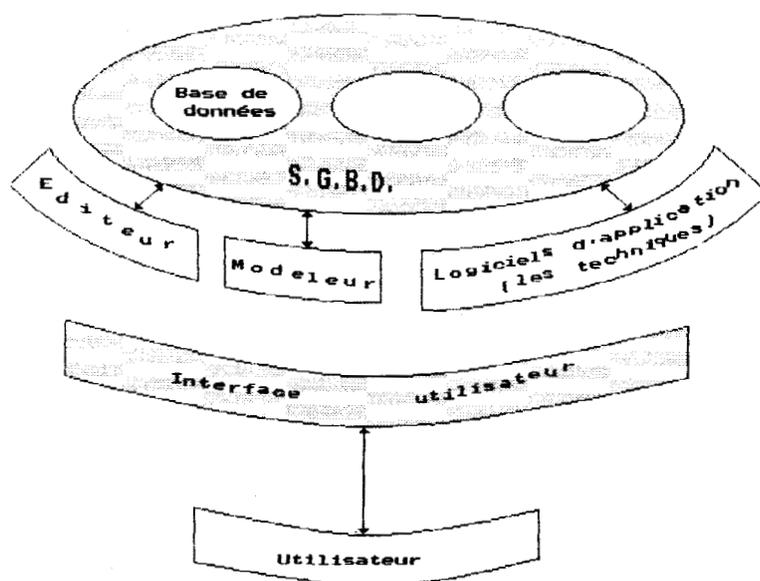


fig 14- Description d'un système de C.A.O.

2.1.2- Les outils existants.

a- Les utilitaires mono-technique :

Ce sont des outils très spécialisés permettant le traitement d'une partie bien précise du projet. Ces logiciels en nombre très important sont disponibles sur le marché :

- D.A.O. (dessin assisté par ordinateur),
- Béton armé,
- Calculs thermiques, etc...

Ces logiciels sont très puissants mais ne peuvent être utilisés que d'une manière isolée; en effet la connexion de ces logiciels en vue de la construction d'un système de C.A.O. pose des problèmes quant à la gestion des données et à l'évolutivité des scénarios d'utilisation .

b- Les systèmes généraux :

Il s'agit d'un ensemble de logiciels de base et de programmes d'application travaillant sur une même B.D.

Ces systèmes du type : CATIA, EUCLID, ... sont surtout utilisés dans les industries aéronautiques et mécaniques, demandent au moins un mini-ordinateur pour leurs utilisations. Ils représentent un investissement très lourd et donc difficilement abordable par les bureaux d'études. Ajoutons que ces systèmes sont orientés vers des problèmes spéciaux très complexes et ne sont pas adaptables à des phases précoces du processus de conception des bâtiments.

D'autres systèmes s'adressant plutôt à des bureaux d'études représentent un investissement abordable par ces derniers. X2A [1] est un prototype de système de C.A.O. bâtiment formé d'un ensemble de modules construits autour d'un S.G.B.D. multibase.

L'originalité de ce système est qu'il est capable de gérer des données manipulées par les architectes et les ingénieurs en phase d'avant projet [10-DUFAU]. Il intègre des modules de définition architecturale, d'évaluation technique et économique, et de visualisation du projet.

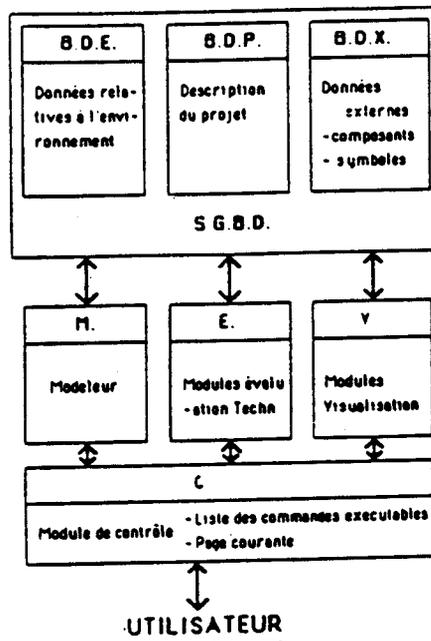


fig 15- Le système de C.A.O X2A. réf[1]

c- Les systèmes de conception architecturale :

Ces systèmes sont destinés aux architectes, opérationnels, et sont surtout utilisés en phase d'A.P.D. et d'exécution :

- fourniture de plans.
- estimatif...

Des systèmes de type : KEOPS, PC-BAT, ..., ne comportent pas de calculs techniques et ne peuvent être utilisés à une phase très en amont de la conception.

CONCLUSION :

La conception d'un projet de bâtiment fait appel bien souvent à des informations heuristiques sur le savoir-faire du concepteur.

L'acte de conception proprement dit est un processus dynamique hautement interactif et évolutif [30-LEDIZES], non déterministe dans son déroulement, conditionné par la personnalité de l'acteur.

Le progrès réalisé dans le domaine de l'I.A. (intelligence artificielle) avec sa capacité à prendre en compte ces règles de savoir-faire laisse penser qu'un couplage entre les S.E. et la C.A.O. est apte à mieux aider le concepteur.

Les S.E. sont des systèmes à base de connaissances conçus pour simuler le raisonnement de l'expert humain et peuvent enrichir la description du processus de conception dans les systèmes de C.A.O. [31-ZREIK].

Les travaux actuels sur les S.E. et sur l'approche cognitive ouvre logiquement la voie à la conception de systèmes de C.A.O. intelligents, capables de gérer d'une manière cohérente les informations de différentes natures et surtout le savoir-faire des experts dans le domaine.

Ces systèmes de conception intelligents assistés par ordinateur [31-ZREIK] sont encore en cours de développement suivant plusieurs axes de recherche :

- Gestion des diverses structures de liens au sein des B.D.
- Interrogation de la B.D selon des points de vue indépendants de l'organisation interne des informations.
- Capacité pour les S.E. de poser à l'utilisateur des questions pertinentes en fonction des informations disponibles dans les B.D.

2.2- Approche multicritère et décision.

Nous avons exposé dans la première partie du mémoire, les difficultés rencontrées lors de la conception d'un système de fondation et les problèmes liés au choix de variantes. Nous présentons dans ce paragraphe l'approche multicritère, et le principe retenu pour le classement multicritère.

2.2.1- L'approche multicritère :

Il existe plusieurs méthodes permettant d'apprécier la qualité d'un projet et de classer un ensemble d'objets au sens de plusieurs critères. ⊕

Les méthodes de type C.S.T.B. et S.E.L.[32] ou la méthode proposée par SAUCE [33] visent à faire un constat de la qualité d'une partie ou du projet bâtiment considéré dans sa globalité.

Les méthodes de classement existantes : ELECTRE I, II et III sont adaptées à des problèmes bien spécifiques.

a- Généralités

Soit un ensemble A d'objets, sur lequel on a défini plusieurs critères. Ces critères imposent à A une certaine structure, plus ou moins forte.

Nous noterons K_1, K_2, \dots, K_n ces critères. On appelle problème multicritère tout problème qui consiste à doter l'ensemble A d'une structure différente de celle qui lui est imposée par les critères K_1 .

Le décideur doit choisir un objet (ou une action) parmi un ensemble A d'objets possibles:

- soient $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$ les caractéristiques des objets possibles

- soient c_1, c_2, \dots, c_j les conditions auxquelles elles doivent souscrire pour que les objets appartiennent à A.

Les théories classiques supposent l'existence d'une fonction d'utilité $U(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots)$ dont les variables sont les caractéristiques des éléments de A et imposent que le décideur choisisse l'objet A_k de A qui minimise U tout en possédant les caractéristiques c_1, \dots, c_k .

Cette notion d'utilité est remplacée dans les méthodes multicritères par la notion moins contraignante de préférence.

Une procédure d'agrégation est une opération mathématique permettant de donner à A une structure plus forte que celle qui résulte du produit logique des critères.

Pour résoudre ce problème, il est donc nécessaire de disposer d'une procédure d'agrégation adéquate [34-MONGOLFIER].

b- Deux familles de méthodes :

b1- Les méthodes utilisant le concept de solutions non dominées.[35-MOULIN]

Ces méthodes se décomposent en deux phases successives. Dans un premier temps elles ne font pas intervenir les préférences du décideur car tous les critères y présentent a priori la même importance (équipotents); ces méthodes aident alors à construire l'ensemble des solutions "non dominées"; c'est la phase de construction de l'ensemble de PARETO.

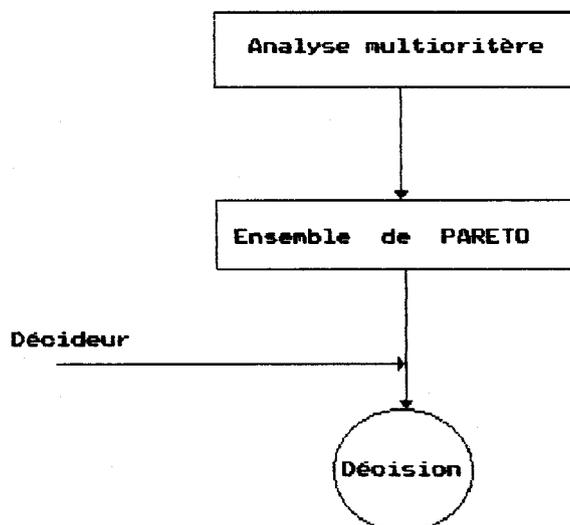
fig 16- Ensemble de PARETO.
(exemple à 2 critères).



Parmi les méthodes utilisant cette approche, on peut citer la méthode des poids, la méthode des contraintes, ... [36-COHON].

Dans un deuxième temps, suite à la construction de l'ensemble de PARETO, le décideur fait intervenir ses préférences pour choisir une solution dans d'ensemble des solutions non dominées; C'est la phase de sélection dans l'ensemble de PARETO (fig 17); La méthode du "Goal Programming Inverse" est la plus répandue dans cette phase [37-GERO].

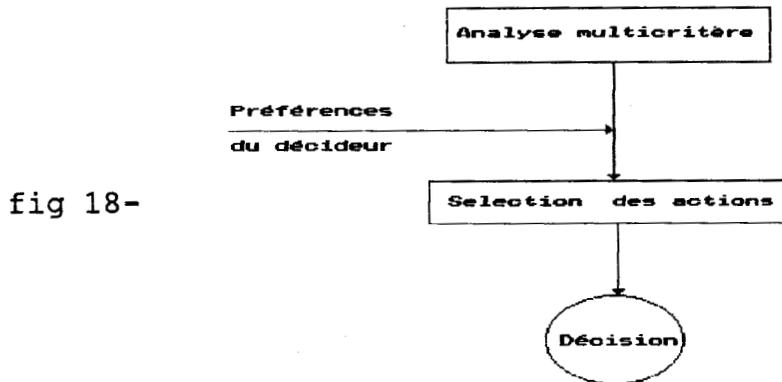
fig 17-



b2- Les méthodes avec formulation à priori des préférences :

Par différence avec les méthodes précédentes, le décideur fait intervenir ses préférences avant la sélection des actions (fig 18). Chaque critère est pondéré suivant l'importance que le décideur (ou groupe de décideurs) lui accorde [36-COHON].

Ces méthodes s'appliquent lorsque les actions forment un ensemble fini dénombrable et lorsque les critères sont assez nombreux [38-BARRAUD].



Parmi ces méthodes on peut citer (ELECTRE II et III). En particulier, ELECTRE III est une méthode basée sur la formulation floue des préférences faisant intervenir la théorie des sous ensembles flous et a été proposée par B.ROY [39].

c- L'approche dans son contexte :

Les critères intervenant dans notre problème particulier du choix des fondations peuvent être résumés ainsi :

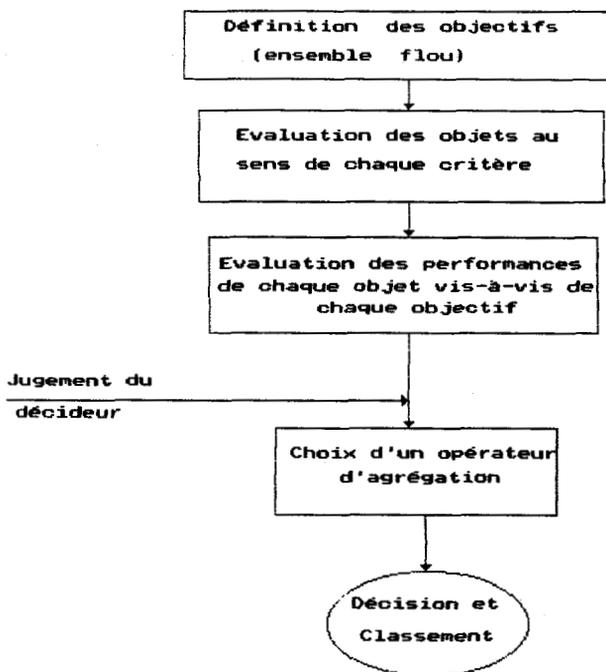
- un critère de stabilité
 - un critère en tassement
 - un critère de coût
- } critère de sécurité

L'évaluation de ces critères à notre niveau de conception a toujours un caractère flou directement lié aux incertitudes développées au chapitre 1.

Il semble donc logique d'adopter une méthode où l'objectif associé à un critère sera représenté par l'intermédiaire d'un ensemble flou (concept développé ci-après).

Nous supposons de plus que les critères sont à priori d'importance égale et que le décideur ne fait intervenir son jugement (ses préférences) qu'après évaluation de chaque objet au sens des objectifs (fig 19) :

fig 19- Principe
de la méthode.



2.2.2- La théorie des sous-ensembles flous et la décision :

Notre objectif ici est de rechercher une méthodologie de sélection multicritère en présence d'informations floues ou incertaines; nous résumons tout d'abord les méthodes de représentation de l'incertain puis nous précisons la méthode retenue pour la prise en compte des incertitudes dans l'acte de décision.

Les modèles de représentation de l'incertain :

Les formes de description de l'incertitude varient beaucoup selon les disciplines.

On distingue deux classes d'incertitude : l'incertain et l'imprécis, la première est la plus répandue dans la littérature scientifique [40-MACGILCHRIST].

Deux moyens traditionnels sont à notre disposition pour la représentation de l'imperfection des informations : le calcul d'erreur d'une part et la théorie des probabilités d'autre part.

D'autres moyens basés sur la théorie des ensembles flous sont aussi capables de traiter les informations imprécises et de leur associer un degré de confiance.

Calcul d'erreur :

Le calcul d'erreur couramment utilisé en physique, ne fait que représenter l'imprécision des appareils de mesures sur les grandeurs qu'on évalue à partir de ces mesures.

On le représente souvent sous forme d'intervalle. Ce modèle de l'incertitude peut être représenté par un ensemble C de points appartenant à l'intervalle (C_{min}, C_{max})

$$C = \{ x / x \in [C_{min}, C_{max}] \}$$

l'appartenance d'un point à cet ensemble peut être décrite par une fonction caractéristique f :

$$f(x) = 1 \quad \text{si } x \in C$$

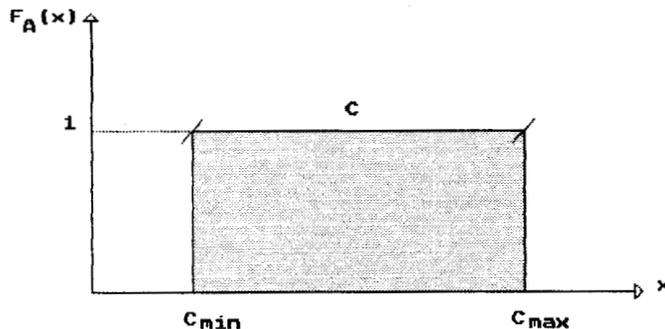
$$f(x) = 0 \quad \text{si } x \notin C$$

Les difficultés de ce type de modèle est la nature discontinue (caractère tout ou rien) de la fonction f.

Prenons l'exemple où $C = \{ x / x \in [0, 100] \}$ alors si $x = 99,99$, on considère que ce point appartient à C, tandis que $x = 100,01$ n'y appartient pas.

Ce type de modèle est représenté par la figure 20 :

fig 20-



La théorie des probabilités :

La théorie des probabilités possède sans doute les outils les plus classiques du traitement de l'incertitude.

Soit E_1 , l'ensemble des événements élémentaires possibles, la probabilité de l'événement E_1 notée $P(E_1)$ est telle que :

$$\sum_{i=1}^N P(E_i) = 1.$$

où E_i représente l'événement i
 N représente la cardinalité de Ω

$$P(E_1) + P(\bar{E}_1) = 1$$

On fait l'hypothèse d'une indépendance totale entre les événements .

Notons que la probabilité peut être obtenue soit à partir d'observations sur la fréquence d'apparition de l'événement, soit à partir d'une estimation subjective.

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$$

$P(A \cap B)$ = Probabilité d'avoir A et B à la fois.

A partir de cette relation, il est possible de définir une relation qui donne la probabilité d'avoir A compte tenu du fait que nous avons observé B, on démontre que (probabilité conditionnelle):

$$P(B/A) = P(A \cap B)/P(A)$$

$$\text{et donc } P(A/B) = P(A \cap B)/P(B)$$

Supposons que nous ayons observé sur 100 semelles identiques sur des sols de nature différentes que :

- 1- Le nombre de semelles telles que le tassement devienne critique = 20
- 2- Le nombre de semelles fondées sur un sol compressible = 10
- 3- Le nombre de semelles - - - -
et telles que le tassement soit critique = 8

alors $P(A) = 20/100 = 0.2$
 $P(B) = 10/100 = 0.1$

$$P(A \cap B) = 8/100 = 0.08$$

donc $P(B/A) = 0.08/0.2 = 0.4$
 $P(A \cap B) = 0.4 \times 0.2/0.1 = 0.8$

On a une chance de 8 sur 10 d'observer un tassement critique des semelles si l'on sait à l'avance que le sol est compressible.

Cette démarche devient beaucoup plus compliquée si l'on veut la généraliser pour faire face à un problème avec plusieurs possibilités (théorème de Bayes généralisé).

2.2.2.1- La théorie des sous-ensembles flous :

a- Définition :

Un ensemble flou est un ensemble, qui contrairement aux ensembles ordinaires, n'a pas une appartenance nettement définie mais comporte des transitions graduelles de l'appartenance complète (degré 1) à la non appartenance (degré 0).

Ceci revient à localiser la valeur d'une variable x en exprimant pour chaque sous ensemble A d'un référentiel la connaissance que l'on possède sur la relation x e A [41-DUBOIS, PRADE].

b- Représentation :

Un sous ensemble flou F d'un ensemble U appelé référentiel, est défini par la donnée d'une application, notée μ de U dans [0, 1]

F

$$\begin{array}{l} \mu : \\ F \end{array} \quad \begin{array}{l} U \longrightarrow [0, 1] \\ u \in U \longrightarrow \mu(u) \\ F \end{array}$$

L'application μ est appelée fonction d'appartenance et la valeur de $\mu(u)$ est le degré d'appartenance.

F

Cette représentation permet une modélisation simple de catégories vagues du langage naturel [42]. Prenons l'exemple d'un essai triaxial pour lequel l'incertitude liée à la cohésion fait qu'on la situe entre 20 et 28 Kpa, on dit que la cohésion est de 24 Kpa "environ".

Une valeur de 24 Kpa appartiendrait totalement à ce concept, tandis qu'une valeur de 20 ou 28 Kpa ne lui appartiendrait que très peu (fig 21)

La représentation graphique de ce concept peut être :

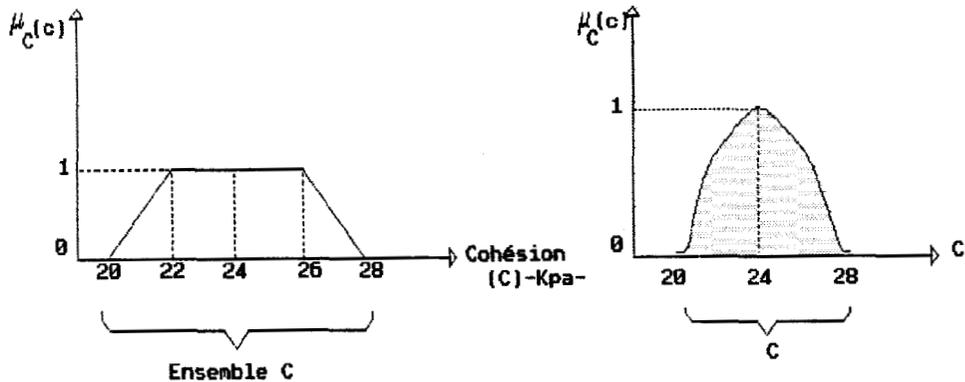
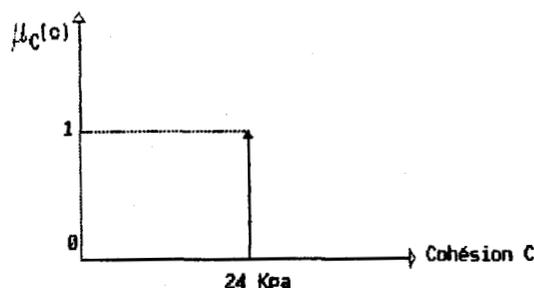


fig 21- Représentation de l'incertain.

Il est bien clair, qu'avec ce type de représentation, il est possible de faire des déclarations précises comme, par exemple, de déclarer " la cohésion du sol est exactement 24 Kpa ". Ce concept est représenté ci-après (fig 22) :

fig 22-



Un ensemble flou M du type L-R, noté $(\underline{m}, \bar{m}, \alpha, \beta)$ est tel que sa fonction d'appartenance est exprimable à l'aide de 2 fonctions L et R et de 4 paramètres $(\underline{m}, \bar{m}) \in \mathbb{R}$ et $\alpha, \beta \geq 0$:

$$\begin{aligned} \mu_F(u) &= L\left(\frac{\underline{m} - u}{\alpha}\right) & u \leq \underline{m} \\ &= 1 & u \in [\underline{m}, \bar{m}] \\ &= R\left(\frac{u - \bar{m}}{\beta}\right) & u \geq \bar{m} \end{aligned}$$

$[\underline{m}, \bar{m}]$ est le noyau de M

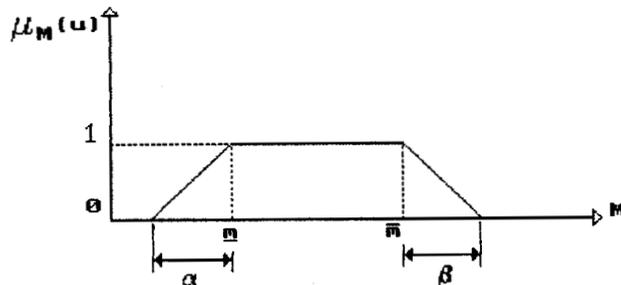
\underline{m} est la valeur modale inférieure.

\bar{m} - - - - - supérieure.

$[\underline{m} - \alpha, \bar{m} + \beta]$ est le support de M.

α, β sont l'étalement à gauche et l'étalement à droite respectivement. Si M est de forme trapézoïdale (fig 23) :

fig 23- Ensemble flou du type L-R.



c- Opérations ensemblistes floues élémentaires :

Soit F et G deux sous ensembles flous de U alors :

$F \leq G$: $u \in U$, $\mu_F(u) \leq \mu_G(u)$ inclusion

$F = G$: $u \in U$, $\mu_F(u) = \mu_G(u)$ égalité

\bar{F} = complément de F dans U : u , $\mu_{\bar{F}}(u) = 1 - \mu_F(u)$

$F \cap G$: u , $\mu_{F \cap G} = \min(\mu_F(u) , \mu_G(u))$ intersection.

$F \cup G$: u , $\mu_{F \cup G} = \max(\mu_F(u) , \mu_G(u))$ union.

associativité, commutativité ...

La définition de ces opérations est due à ZADEH (repris par [41-DUBOIS, PRADE]) et coïncide avec les définitions classiques lorsque les ensembles considérés sont des sous ensembles usuels.

D'autres opérations ensemblistes floues ne correspondent à aucune opération ensembliste classique dont les principales sont les moyennes et les sommes symétriques :

Opérations de la moyenne :

La moyenne de deux ensembles flous est définie à l'aide d'une application h de $[0,1]^2$ dans $[0,1]$ telle que :

$\min(x,y) < h(x,y) < \max(x,y)$, x,y ; $h \in \{\min, \max\}$
 $h(x,y) = h(y,x)$
 h est non décroissant en fonction de chaque argument.
 h est bisymétrique :

$$x,y,a,b \quad h(h(x,y), h(a,b)) = h(h(x,a), h(y,b))$$

la moyenne harmonique est définie par $2.x.y/(x+y)$

la moyenne géométrique est définie par $\sqrt{x.y}$

la moyenne arithmétique est définie par $(x+y)/2$

la médiane est définie pour un seuil $\alpha \in]0,1[$ par :

$$\begin{aligned} \text{med}(x,y,\alpha) &= y \text{ si } x < y < \alpha \\ &= \alpha \text{ si } x < \alpha < y \\ &= x \text{ si } \alpha < x < y \end{aligned}$$

Les sommes symétriques :

DUBOIS [41] a étudié cette classe et a proposé la forme des sommes symétriques associatives. un exemple de somme symétrique associative est $\sigma = (x.y)/(1-x-y+2xy)$.

2.2.2.2- Cadre conceptuel pour le classement des solutions possibles :

L'objectif global étant décomposé en objectifs partiels, le but du décideur est de pouvoir classer les variantes en sa possession en harmonie avec sa vision globale du problème posé.

Soit Ω l'ensemble des objets (propositions/solutions/actions..) et w un élément de Ω

Soit X_1 le domaine d'évaluation des objets au sens du critère $c_1 \in C$.

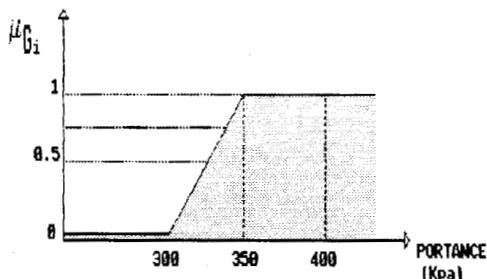
Les évaluations des objets de Ω au sens de c peuvent être représentées au moyen d'une application m_1 de Ω dans X_1 (où Ω représente l'ensemble d'objets à classer).

Nous supposons qu'un objectif partiel, selon un critère, est formulé d'une manière imprécise; cet objectif sera décrit par un ensemble flou G_1 sur X_1 .

Prenons l'exemple où l'objectif en matière de portance d'une fondation est défini de manière à ce que l'évaluation du critère (portance dans cet exemple) soit supérieure à 350 Kpa et

que dans tous les cas cette valeur ne doit être inférieure à 300 Kpa; La capacité portante d'une semelle, par exemple, prend une valeur réelle, l'objectif qui lui est associé sera décrit à partir d'un ensemble flou G représenté par :

fig 24- Représentation d'un objectif simple à l'aide d'un ensemble flou.



Lorsque la fonction d'appartenance μ est égale à 1 il y a compatibilité totale entre la semelle proposée et le souhait du décideur qui a été traduit par l'objectif partiel de satisfaction en matière de portance. Par contre si $\mu = 0.5$, cette semelle est moyennement compatible avec l'objectif tel qu'il a été formulé par le décideur. Enfin, si $\mu = 0$, La semelle est incompatible avec cet objectif.

L'évaluation des objets au sens d'un critère se traduit par une valeur ponctuelle; Or cette évaluation est imprécise en raison des données, des méthodes, du niveau de conception...; Donc pour tenir compte de cette imprécision nous décrirons l'objectif qui lui est associé d'une manière floue.

a- Spécification de l'objectif global :

Définition des concepts utilisés :

- . Un objectif élémentaire est un objectif lié à un seul critère ; il traduit le souhait du décideur relatif à un critère donné.
- . Un sous-objectif est un groupement de plusieurs objectifs élémentaires.
- . Un objectif global est un ensemble de sous-objectifs et d'objectifs élémentaires.

L'objectif global est exprimé, donc, sous forme d'un ensemble de sous-objectifs composé de N objectifs partiels (G_1) associés à N critères élémentaires C_1 permettant d'évaluer les objets de Ω .

L'objectif global se réduit à l'agrégation des ensembles flous de fonctions d'appartenance $\mu_1(w)$ définies par :

$$\mu_1(w) = \mu_{G_1}(m_1(w)).$$

On suppose donc l'existence d'une application h de $[0, 1]^N \longrightarrow [0, 1]$ telle que :

$$u \in \Omega \quad \mu_D(w) = h(\mu_1(w), \dots, \mu_N(w))$$

où D représente l'ensemble des objets compatibles avec l'objectif global.

On est donc ramené, pour évaluer la conformité de chaque objet (w) avec l'objectif global, à la recherche d'une opération ensembliste floue (h) qui combine les objectifs partiels.

BELLEMAN et ZADEH utilisent pour h principalement l'opération minimum [43] et ceci dans une optique essentiellement Système-Expert.

Cette opération minimum correspond à une conjonction d'objectifs et ne s'avère pas toujours adaptée pour traduire correctement l'attitude du décideur.

Il est donc nécessaire de rechercher d'autres façons d'agréger des ensembles flous; les opérations telles que celles définies dans le paragraphe précédent répondent dans certains cas à ce problème.

Cette démarche peut être décrite de la manière suivante (fig 25) :

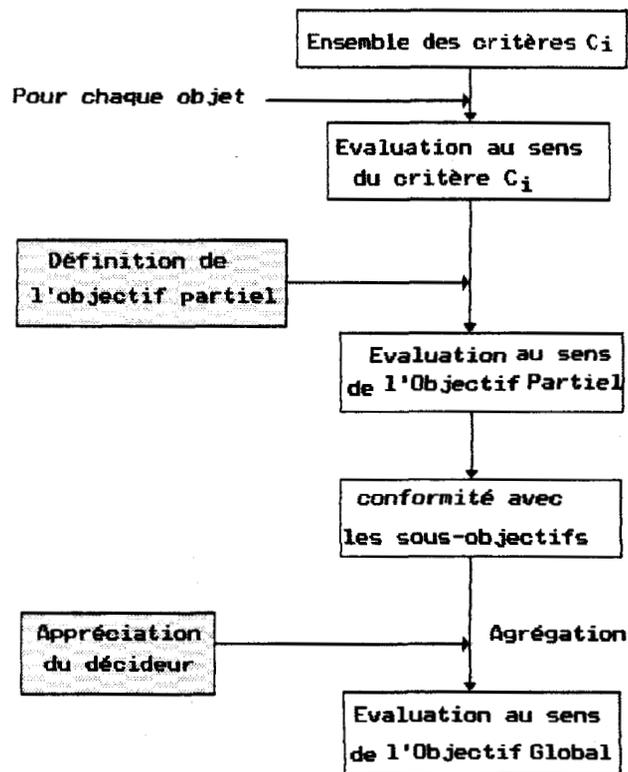


fig 25- Démarche pour l'Evaluation au sens de l'objectif global.

b- Compatibilité avec les objectifs partiels :

L'objectif associé au critère C_1 est décrit par un ensemble flou G_1 sur X_1 de telle manière que $\mu_{G_1}(x)$ soit le degré de compatibilité entre la valeur de x caractéristique d'un objet w et le souhait du décideur.

Pour identifier μ nous représentons G_1 sous forme d'un ensemble flou de type L-R; le décideur fournit alors le noyau de G_1 (évaluations parfaitement compatibles avec l'objectif), le support et les étalements à gauche et à droite.

Si G_1 représente l'objectif associé au critère de coût, le décideur peut décrire son objectif partiel par une courbe du type :

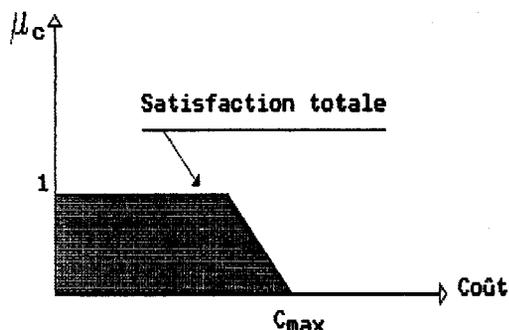


fig 26- Représentation de l'objectif relatif au critère de coût.

Nous pouvons définir donc, connaissant l'objectif G et le critère C_1 , un jugement de chaque objet w quand à sa compatibilité relative à l'objectif G_1 par la fonction d'appartenance μ définie par $\mu_1(w) = \mu_{G_1}(m_1(w))$

c- Agrégation des critères :

Prenons tout d'abord le cas de deux objectifs, nous pouvons distinguer trois attitudes fondamentales du décideur :

- une attitude exprimant la satisfaction simultanée des objectifs ; on a : $h(s_1, s_2) \leq \min(s_1, s_2)$.
- une attitude exprimant la redondance de deux objectifs satisfera : $h(s_1, s_2) \geq \max(s_1, s_2)$.
- le compromis est traduit par : $\min(s_1, s_2) < h(s_1, s_2) < \max(s_1, s_2)$

Ces types d'agrégation sont prises en comptes par les opérations ensemblistes (classiques ou floues) définies ci-dessus.

Cette démarche reste valable dans le cas où le nombre de critères N est supérieure à 2, par combinaison symétrique des objectifs associés aux critères. L'opération h sera définie par :

$$h^2 = h$$

$$h^N(s_1, s_2, \dots, s_N) = h(h^{N-1}(s_1, s_2, \dots, s_{N-1}), s_N)$$

d- Identification des opérations :

Nous utilisons la méthode proposée par Prade et Dubois [41] pour l'identification des opérations.

Elle consiste à questionner le décideur et à rechercher l'opération la plus proche de ses réponses dans un catalogue donné.

Nous présentons le déroulement de cette méthode dans le cas particulier de deux objectifs; On demande l'avis du décideur sur trois objets tels que :

- Le premier soit incompatible avec l'objectif (G_1) mais totalement compatible avec l'objectif (G_2).
- Le deuxième soit moyennement compatibles avec G_1 et G_2 .
- Le troisième soit moyennement compatible avec G_1 , totalement compatible avec G_2 .

Ses réponses sont soit quantitatives soit qualitatives ordonnées. Chaque triplet de réponses correspond à une opération standard.

Le degré de compatibilité de l'objet avec l'objectif global est alors calculé par application de l'opération d'agrégation sélectionnée sur les évaluations des objectifs partiels.

Conclusion :

La théorie des ensembles flous semble adaptée pour prendre en compte le caractère incertain de données et pour le classement des objets par l'intermédiaire d'une évaluation de l'objectif global.

La décomposition de l'objectif global en sous objectifs et objectifs partiels permet au décideur, par le biais d'une interrogation interactive, de privilégier certains critères à l'encontre de ceux dont l'évaluation ne s'avère pas très fiable.

CONCLUSION de la première partie :

De l'étude faite dans cette première partie sur les problèmes posés à la conception des infrastructures de bâtiment et plus précisément les fondations, il ressort la nécessité d'avoir une approche globale du problème et qu'il convient de ne pas déconnecter l'étude des fondations de l'étude d'autres composants du bâtiment.

Nous avons recensé les éléments intervenant dans l'étude des fondations et les principaux problèmes à résoudre. Il apparaît que le choix d'une solution de fondation dépend du critère économique mais aussi de critère de sécurité.

Nous proposons un cadre de l'étude technique limité au critère de la portance et au critère de tassement des fondations. L'importance des incertitudes sur les paramètres extérieurs (sol, superstructure,...) implique leur considération dans l'acte de décision.

Deux types d'outils s'avèrent donc nécessaires :

. D'une part des outils prévisionnels d'évaluation technique et économique d'une proposition d'un système de fondation. Ces outils doivent permettre de faire un constat technique global d'une proposition et ne doivent pas imposer à l'utilisateur un mode de travail prédéterminé.

L'évaluation technique des fondations dépend en grande partie de la nature du sol sous l'ouvrage, ce qui nécessite une modélisation du sol compatible avec le niveau de conception retenu.

Ces outils doivent donc intégrer plusieurs possibilités d'évaluation selon la nature de sol. Il ne s'agit pas de proposer une nouvelle approche mais d'adapter les méthodes existantes, et de préférence celles qui relèvent de la réglementation, à notre cadre d'étude.

. D'autre part, des outils qui permettent de prendre en compte l'incertitude sur les évaluations dégagées des outils précédents, dans l'acte de décision. Les outils prévisionnels permettent de faire un constat rapide de plusieurs propositions de système de fondation, les outils d'aide au choix d'une solution doivent intégrer le degré de fiabilité que l'on accorde aux évaluations des propositions. Une démarche basée sur la théorie des sous-ensembles flous permet d'intégrer le jugement du décideur sur ces évaluations.

Deuxième Partie:

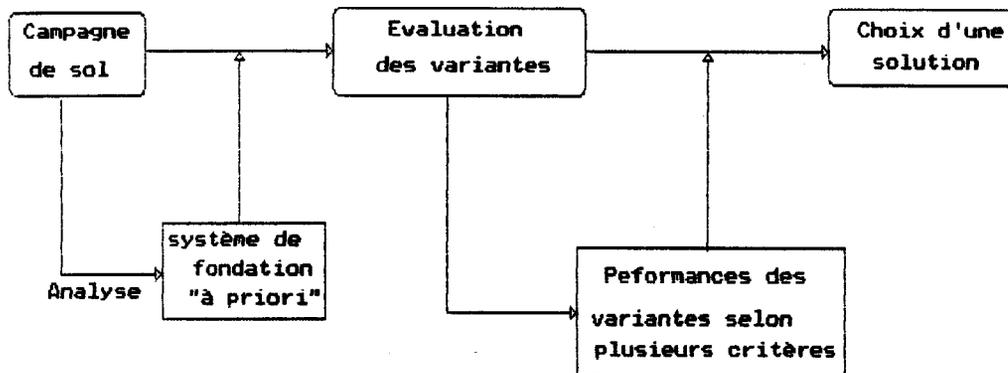
Evaluation et aide au choix d'un
système de fondation

INTRODUCTION

L'analyse de la conception des fondations a montré que, comme pour la conception de la superstructure, c'est lors des premières phases de conception que les décisions sont les plus importantes. Les outils existants dans le domaine sont destinés à des phases avancées dans le processus de conception, et sont généralement sophistiqués mais ne couvrent que des problèmes spéciaux (méthode des éléments finis pour les ouvrages d'art, plateformes pétrolières...). C'est aux phases précoces de la conception qu'il manque d'outils adéquats.

De l'analyse faite dans la première partie de ce mémoire découle une décomposition du projet de fondations en 3 étapes :

- Campagne de sol.
- Evaluation de propositions (système de fondation "a priori").
- Choix d'un système de fondation.



La campagne de sol permet généralement de dégager une ou plusieurs variantes possibles. La deuxième étape consiste à évaluer les éléments de chaque variante en vue de sa validation. Ce n'est que dans la troisième étape que le décideur fait son choix de la solution la plus adaptée. C'est à ces trois étapes que nous apportons des éléments de réponse.

Dans le premier chapitre de cette partie nous proposons une description des différents éléments intervenants dans l'étude des fondations ainsi qu'une organisation homogène de ces éléments. Les méthodes d'évaluation retenues sont développées dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre est consacré à la proposition d'une démarche de sélection d'une solution parmi plusieurs variantes, démarche basée sur la théorie des sous-ensembles flous.

1- MODELE CONCEPTUEL.

Le traitement du système de fondation nécessite la connaissance de certaines informations en provenance du bâtiment, du sol et une description des différents éléments le constituant.

Nous développons dans ce paragraphe, les modélisations retenues pour les différents éléments nécessaires à ce traitement ainsi que les relations qui les relient.

1.1 - Les Modélisations.

Une démarche conceptuelle nécessite la définition des objets manipulés, à travers des modélisations ainsi que les relations entre " objets ". Ces objets peuvent être résumés par :

- " Superstructure ".
- " Sol de fondation ".
- " Elément de fondation ".

1.1.1- Les objets de la superstructure concernés :

La descente de charge étant réalisée, la validation technique des éléments de fondation et leur prédimensionnement nécessitent la connaissance des caractéristiques géométriques des éléments porteurs de la superstructure et la valeur de la charge transmise aux fondations. Cette charge sera saisie ainsi sous forme d'une charge de service (E.L.S) et une charge ultime après pondération (E.L.U.R).

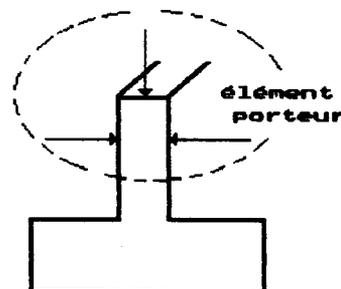
En l'absence d'un schéma " STRUCTURE ", les attributs de l'élément superstructure seront stockés directement dans l'objet "élément de fondation".

Les éléments de la superstructure sont :

- Poteau : élément isolé.
- Mur, voile : - linéaire.
- Dalle : élément surfacique.

La description peut être alors :

- . Grande dimension (Poteau, Mur, Voile...)
- . Petite -
- . Charge à l'E.L.S.
- . Charge à l'E.L.U.R.



1.1.2- Un modèle approché du sol :

L'un des problèmes majeur dans l'étude de l'infrastructure des bâtiments est la discrétisation du sol sous l'ouvrage. Le sol est défini par des caractéristiques géométriques et qualitatives et par des caractéristiques mécaniques. Ces éléments sont nécessaires à l'estimation du comportement du sol après chargement.

La dispersion des sondages lors de l'étude du sol pour un projet donné, rend compliqué la construction d'une modélisation continue du sol sous l'ouvrage [44-BOULEMIA].

Les concepteurs procèdent généralement par interpolation et/ou extrapolation des informations dont ils disposent pour couvrir toute la surface du terrain.

Dans notre travail, le sol est considéré comme une succession de couches de comportement différent. Le comportement de ces couches est déduit des résultats d'essais de reconnaissance réalisés. La description du sol passe donc par une modélisation des couches et des essais.

a- La " COUCHE " :

Une couche de sol est décrite par son épaisseur, sa nature, son poids volumique, le pendage et l'état de la nappe (fig 1-a) :

```

saisie des caractéristiques
d'une COUCHE du sol
-----
épaisseur de la couche - en mètres - : 4
profondeur de la nappe - : 2.6
pendage - en degrés - : 0

NATURE SOL
-----
1...ARGILE-LIMON
2...ARGILE RAIDE LIMON COMPACT
2...sable compress.,roche tendre
3...ROCHE,SABLE,GRAVIER
4...SABLE ET GRAVIER TRÈS COMPACT

nature de la couche : 1
poids spécifique - en Kn/m3 - : 20.5
numero de la couche : 1
    
```

Vous avez 3 occurrences
d'objet "couche"

H	nappe	pendage	nature	poids spec	numéro
4.00	2.60	0.000	1	20.50	1
12.00	0.00	0.000	2	19.50	2
10.00	0.00	0.000	4	19.00	3

- 1 ajouter des éléments
- 2 modifier
- 3 supprimer
- 4 fin

-a-

-b-

fig 1- Description d'une couche de sol.

Un élément de fondation peut reposer sur un sol constitué de plusieurs couches liées à des essais différents, les couches existantes dans le plan et en profondeur seront décrites d'une manière indépendante (fig 1-b).

Notons qu'une profondeur de la nappe égale à zéro, signifie que la nappe règne dans cette couche.

b- L'ESSAI :

L'essai réalisé fourni des caractéristiques mécaniques d'une couche du sol. Ces caractéristiques ne sont pas les mêmes pour tout les types d'essais possibles. D'où la nécessité d'une description spécifique pour chaque essai.

Les essais pris en compte sont :

- En LABORATOIRE :
- . Triaxial.
 - . Boite de 'CASAGRANDE'.
 - . Compression simple.
 - . Oedomètre.

- IN-SITU :
- . Pressiomètre.
 - . Pénétrömètre STATIQUE.
 - . Pénétrömètre STATIQUE-DYNAMIQUE

La description d'un essai triaxial (fig 2) est la suivante :

- . Identificateur.
- . La cohésion (en Kpa).
- . L'angle de frottement interne (en degrés).
- . La profondeur de l'échantillon.

La profondeur est un facteur nécessaire au traitement de la qualité des évaluations (problème d'interpolation, extrapolation, etc...).

fig 2- Structure d'un essai triaxial.

Le PROJET contient
2 occurrences d'objet TRIAXIAL

c (en Kpa)	phi (degrés)	profondeur (mètres)	numéro -
25.00	15.00	2.00	1
10.00	20.00	8.00	2

1 ajouter des éléments
2 modifier
3 supprimer
4 fin

VOTRE CHOIX : 1

saisie d'un essai TRIAXIAL

la cohésion - en Kpa - : 25
l'angle de frottement interne - en degrés - : 15
profondeur de l'échantillon - en mètres - : 18
Donnez un numéro à l'essai réalisé : 3

Pour un essai pressiométrique ou pénétrométrique, c'est la courbe correspondante qui sera saisie, ainsi pour un essai pressiométrique, par exemple, nous introduisons les valeurs de la pression limite et le module pressiométrique en fonction de la profondeur :

Vous avez 5 occurrences d'objet 'Pressiomètre' ***** essai numero: 1		
profondeur (mètres)	Epressio (Kpa)	pl-p0 (Kpa)
*****	-----	-----
0.5	0.0	0.0
1.0	5000.0	560.0
1.5	3000.0	350.0
2.0	2000.0	200.0
2.5	2200.0	220.0
3.0	2500.0	250.0
3.5	2700.0	270.0
4.0	3000.0	300.0
4.5	4000.0	600.0
5.0	10000.0	1200.0
5.5	10005.0	1300.0
6.0	12000.0	1500.0
6.5	10000.0	1300.0
7.0	9000.0	1100.0
7.5	8000.0	800.0
8.0	7000.0	600.0

fig 3- Saisie de la courbe pressiométrique.

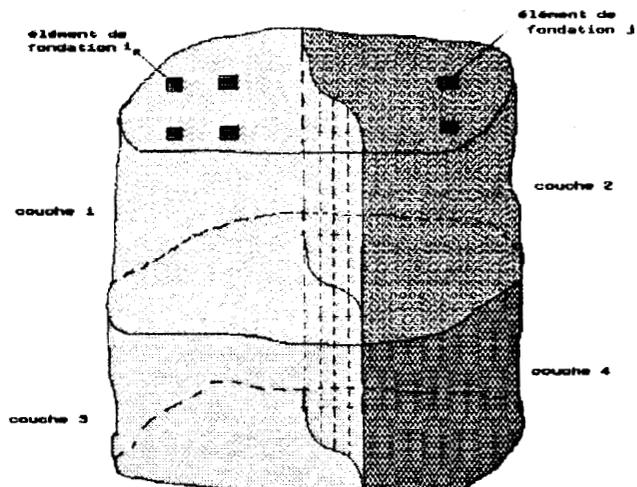
NOTE : Les autres essais sont décrits en annexe(1).

c- Génération d'un cas de "SOL" :

Un cas de sol est lié à un élément de fondation ou une partie du système de fondation; il décrit les caractéristiques générales et mécaniques des différentes couches présentes sous un élément du système de fondation. Ceci signifie que le sol de fondation sera vue ici comme un ensemble de "cas de sol": il est donc nécessaire de définir les différentes couches dans le plan et en profondeur :

L'élément de fondation i est lié au cas du sol composé de la couche 1 et la couche 3.

L'élément de fondation j est lié au cas du sol composé de la couche 2 et la couche 4.



La génération d'un cas du sol est réalisée par définition du nombre de couches en profondeur constituant le sol, et des essais réalisés.

Deux couches sont liées par la relation: "repose sur"; cette relation définit la profondeur à partir de laquelle une couche est présente, l'épaisseur étant connue, nous pouvons donc générer un cas de sol.

Prenons l'exemple où le sol de fondation comporte 3 couches (nous supposons que ces couches sont les mêmes dans le plan. Ces trois couches sont saisies d'une manière indépendante (fig 4) :

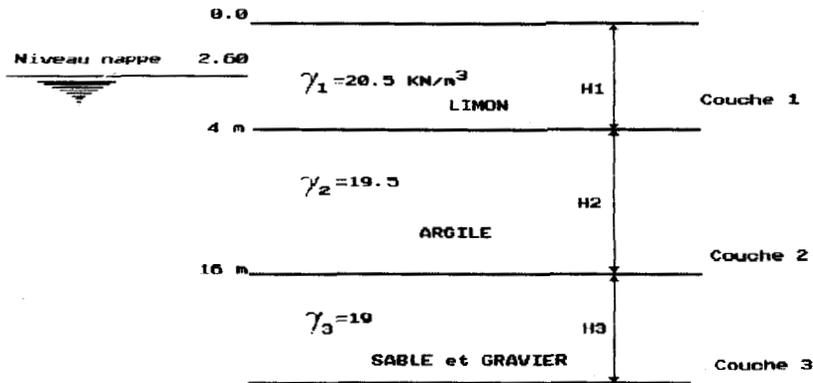


fig 4-

La relation de liaison entre une "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 de LIMON qui "repose sur" la couche d'ARGILE qui, elle même "repose sur" une couche de SABLE.

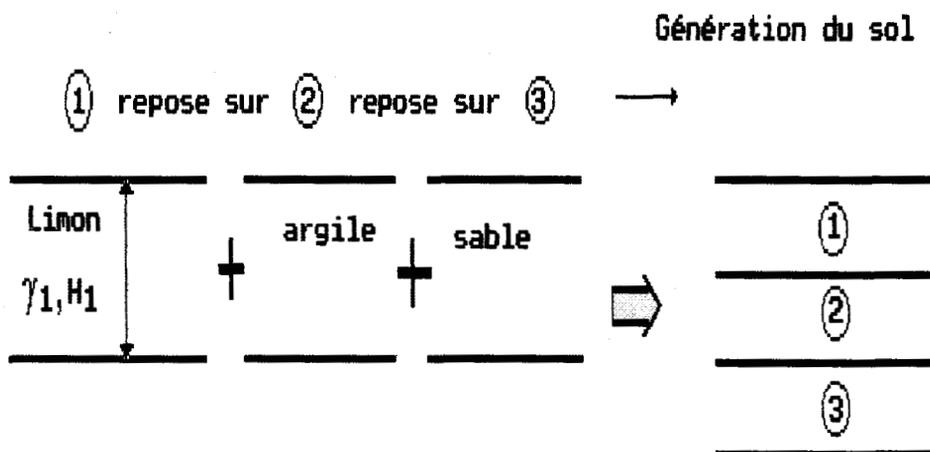


fig 5- Principe de la génération du sol.

La description générale du sol peut être illustrée par la figure 6 :

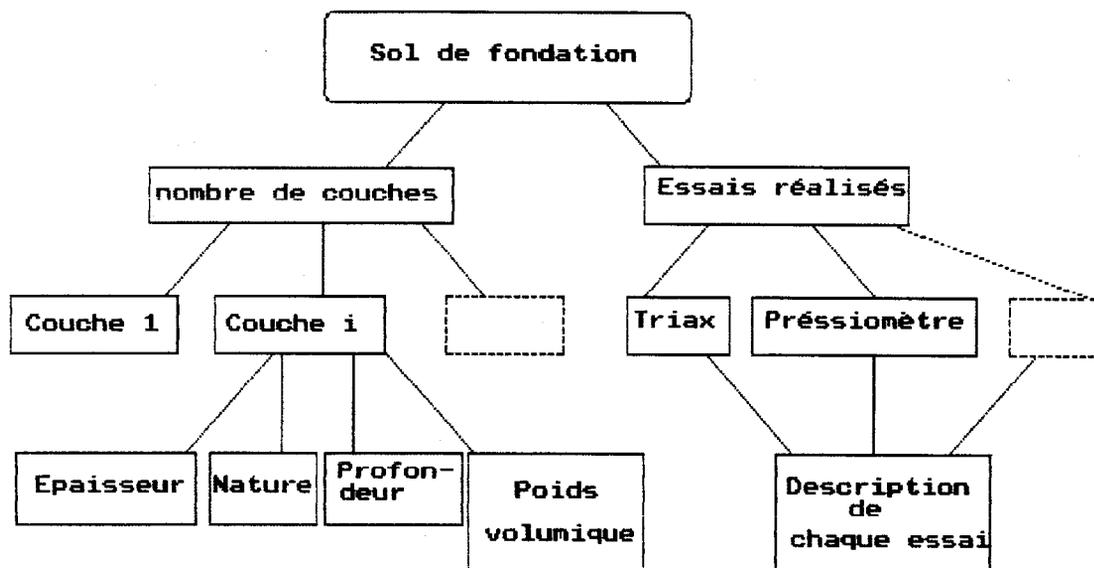


fig 6- schéma général adoptée pour le sol.

1.1.3 Les éléments du système de fondation :

Un élément de fondation est décrit par des caractéristiques géométriques et les valeurs des évaluations techniques et économiques provenant des logiciels d'applications, et c'est l'avancement du projet qui définit l'état d'un objet à travers ses attributs [45-AL-HAJJAR].

La description d'un élément de fondation dépend de la "CLASSE D'OBJETS" à laquelle il appartient dans la famille d'objets :

3 familles sont pris en compte :

- 1- Fondation SUPERFICIELLE.
- 2- - SEMI-PROFONDE.
- 3- - PROFONDE.

Les éléments superficiels sont décomposés en 2 classes : SEMELLES et RADIERS. Les éléments profonds seront décrits, entre autres, par leur modes d'exécution et le matériau utilisé. La description d'une semelle sur pieux, par exemple, sera la suivante (fig 7) :

fig 7- Semelle
sur 2 pieux.

création d'un objet semelle			

numero de la semelle	:	12	
longueur en mètres	:	2.80	
largeur -	:	0.70	
profondeur -	:	1.60	
epaisseur -	:	1.25	
hauteur en rive -	:	1.25	
grand coté poteau ou mur en cm	:	40.0	entraxe -pieux- mètre :2.00
			diamètre pieux - :0.6
petit coté - - cm	:	40.0	
la charge E.L.S Kn	:	1200.00	la charge E.L.U :1600.00
- Kn/ml	:	---	la charge E.L.U : -
Contrainte admissible en Kpa	:	200.00	
Tassement en cm	:	0	
poids d'acier en Kg	:	0	
volume du béton m3	:	0	
surface de coffrage en m2	:	0	
type de la semelle	:	sem2p	

Notons qu'à tout instant l'utilisateur peut intervenir pour modifier les attributs de ces objets, et que certains attributs sont le fruit d'un calcul en provenance d'un programme d'application (ces programmes d'applications seront développés plus loin).

1.2- Les relations et les scénarios :

Les différents éléments intervenant dans le projet de fondations, développés dans le paragraphe précédent, sont liés entre eux par des relations permettant leur utilisation pratique, pour une évaluation du projet.

. Les relations :

Compte tenu des modélisations retenues, le projet de fondation est formé d'un système de fondation et d'un sol de fondation :

Un système de fondation est composé d'éléments de fondation (radier, semelles...) et d'éléments de liaison (poutres de liaison, longrines...).

Un sol de fondation est composé de couches et d'essais (triaxial, pressiomètre...).

Les attributs caractérisant un sol de fondation représentent des données de base des évaluations des fondations. Les autres relations sont :

Un élément porteur "repose sur" un élément de fondation.

Un élément de fondation "repose sur" un sol de fondation.

Une couche de sol "repose sur" une couche de sol.

Un essai est "lié à" une couche de sol (pour les essais de laboratoire).

Un essai est "lié à" un sol de fondation (pour les essais in-situ).

. Utilisation pratique de la modélisation :

L'évaluation d'un élément de fondation est réalisée après dénomination de l'élément en faisant appel aux attributs des couches du sol et des essais désignés. L'évaluation suppose donc la définition du sol de fondation par l'intermédiaire de la modélisation précédente. Deux scénarios sont envisagés :

1- Le premier consiste à caractériser le sol de fondation par un seul modèle défini à partir d'un ensemble de couches et d'essais.

2- Le deuxième suppose la génération d'un cas de sol pour chaque élément de fondation. Ceci se justifie par l'utilisation d'essais différents pour l'évaluation des différents éléments de fondation, ou par le fait que les couches de sol ne sont pas identiques sous les éléments (épaisseurs, poids volumiques différents ...). Dans ce cas, les couches (même légèrement différentes) seront définies d'une manière séparée.

1.3- Limites du modèle et conclusion :

Même si la définition des différents éléments du projet à partir des modélisations précédentes paraît simple, la principale difficulté d'utilisation pour réaliser les évaluations, est que l'utilisateur doit indiquer, pour chaque élément de fondation, l'identificateur de chaque couche et de chaque essai réalisé. Ceci se traduit par une intervention permanente de l'utilisateur en cours de traitement de l'ensemble. Cette difficulté est levée dans un seul cas, cas où l'on juge acceptable d'assimiler les mêmes couches et les mêmes essais à une partie ou l'ensemble du projet.

L'automatisation de cette phase d'évaluation est possible en spécifiant, dans le schéma "élément de fondation", les essais à partir desquels les évaluations techniques sont souhaitées. Le problème d'acquisition d'informations supplémentaires sur les couches du sol reste posé en absence d'un modèle unique du sol.

Notons que l'avantage de la description du sol en "couches" et "essais" et de donner la possibilité à l'utilisateur d'introduire des informations supplémentaires (précision sur les couches, résultats d'essais complémentaires...) à tout moment et de pouvoir les utiliser pour confirmer ou justifier les éléments du projet.

2- ETUDE ET EVALUATION DES FONDATIONS.

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons exposé les problèmes posés au traitement des fondations qui peuvent être résumés par :

- Le prédimensionnement.
- l'Evaluation de la portance.
- l'Evaluation du tassement.
- l'Evaluation économique.

En amont du traitement des fondations, le projetteur est confronté au problème de choix de la campagne d'essais et d'interprétation des résultats d'essais.

La réglementation [19-DTU] [20-DTU] demande de vérifier les éléments de fondation vis-à-vis de la portance et du tassement. Si les 2 problèmes sont liés physiquement, les méthodes de calcul sont basées sur des approches différentes : théorie de la plasticité parfaite pour la capacité portante, théorie de l'élasticité linéaire pour le tassement. Dans ce chapitre, nous détaillons les méthodes de calculs nécessaires, pour répondre aux sous-problèmes posés.

2.1- La campagne d'essais :

La campagne d'essais est réalisée par une entreprise spécialisée. Les méthodes d'investigation font appel à la géologie. Le programme des sondages peut être défini en fonction de l'importance de l'ouvrage, et les conclusions du rapport géologique.

L'entrepreneur doit déterminer :

- L'implantation des forages.
- Leur nombre.
- Le choix d'essais à effectuer sur place.
- Le type d'essais à effectuer en laboratoire.
- La profondeur de reconnaissance.

Nous nous sommes intéressés à la définition d'une liste d'essais à réaliser ainsi qu'à la profondeur de reconnaissance.

2.1.1- La profondeur de reconnaissance :

Cette étude est basée sur l'hypothèse suivante:
L'ingénieur chargé de déterminer la profondeur de reconnaissance ne connaît, a priori, que le sol qui apparaît en surface, et pour lequel il peut estimer les valeurs de la cohésion du sol (C), de l'angle de frottement interne (Φ) et du poids volumique du sol (des valeurs par défaut sont prévues en fonction de la nature de la couche en surface).

Cette étude nécessite l'acquisition d'informations de diverses natures à travers un ensemble de questions-réponses et qui peuvent être classées :

- Interrogation sur le bâtiment projeté :

- . Longueur et largeur du bâtiment (L et B).
- . Profondeur prévue pour la base des fondations (D).
- . La pression moyenne à la base de la fondation=

Masse/S où S représente L.B
et Masse est la masse du bâtiment.

- Interrogation sur le sol :

- . La nature du sol (Argile, Limon, Sable...).
- . La cohésion du sol.
- . L'angle de frottement interne.
- . La valeur du module d'Young qui peut être déduite du module oedométrique (E_{oed}) par la formule suivante :

$$E_{young} = \frac{(1+\gamma)(1-2\gamma)}{(1-\gamma)} E_{oed}$$

- Interrogation sur le type de fondation projeté :

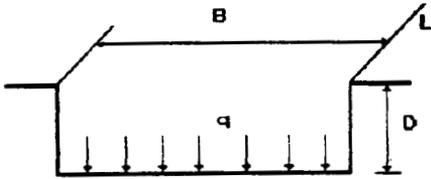
- . Dimensions des fondations.
- . Espacement des éléments porteurs (distance entre poteaux ou voiles...) ou largeur du radier, selon le cas.
- . La pression moyenne appliquée sur les éléments de fondation.

Le calcul de la profondeur de reconnaissance est basée sur la méthode proposée par CORDARY et al. [46]. Il s'agit de rechercher les profondeurs de reconnaissance d'après la sécurité vis-à-vis de la capacité portante et d'après les critères se rapportant au risque de tassement (absolu et différentiel). La profondeur proposée sera pris égale au maximum des valeurs trouvées selon chaque critère.

a- Critère se rapportant au risque d'instabilité :

Nous étudions le cas où la contrainte admissible estimée, à une profondeur D est supérieur à la pression moyenne prévue à la base de la fondation. Dans l'autre cas nous indiquons qu'il faut changer le type de fondation pour passer en fondation profonde ou semi-profonde.

La profondeur de reconnaissance (H_{port}) sera calculée de telle manière que la présence d'une couche de mauvaise qualité à cette profondeur n'aura plus aucune influence. CORDARY [46] propose les formules suivantes :



Le sol superficiel est sans cohésion:

$$H_{port} = D + 1.25 B \sqrt{(q - \gamma_0 D) / B}$$

Le sol superficiel est purement cohérent:

$$H_{port} = D + 1.25 (q - \gamma_0 D) / C$$

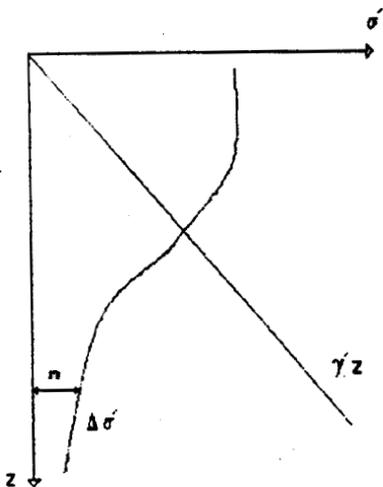
γ, c, φ

- fig 8-

b- Critère se rapportant au risque de tassement :

b.1- Critère en contraintes :

Soit $\Delta \sigma'_z$ la surcharge apportée par la fondation au niveau Z sous la fondation et $\gamma'z$ le poids des terres à ce niveau. La profondeur de reconnaissance est calculée de telle manière que $\Delta \sigma'_z / \gamma'z < m$ où m est un coefficient dépendant du risque accepté (fig 9) :



$m=0.1$ pour les sols fins.

$m=0.2$ pour les sols grossiers.

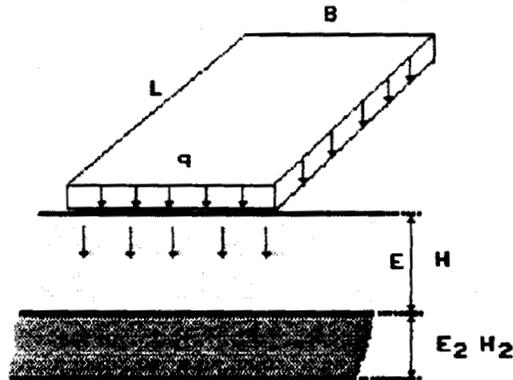
fig 9- Répartition des contraintes sous la fondation.

b.2- Critère en tassement :

Le but est de déterminer l'accroissement (Δw) du tassement que provoquerait l'existence d'une couche très compressible (fig 10) à une profondeur D.

Soit H, E l'épaisseur et le module de Young de la couche superficielle; et H_2, E_2 les caractéristiques de la couche compressible.

fig 10- Couche compressible de caractéristiques H_2, E_2 .



$$\Delta w = (q - \gamma_o \cdot D) \frac{H_2}{E_2} \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} O_z(H/B, L/B)$$

H_2 est estimé à 3 mètres et $E_2 = E/10$

si on pose $\psi = \frac{\Delta w}{H_2} \cdot \frac{E_2}{(q - \gamma_o \cdot D)}$

alors $\psi (H_2/B) = \left(\frac{\Delta w}{B_o}\right)_{adm} \cdot \frac{B_o}{H_2} \cdot \frac{E_2}{q}$

avec B_o = largeur du radier ou espacement des poteaux (ou refends).

Les valeurs de O_z sont présentées en annexe 4. Le calcul est réalisé pour un tassement différentiel admissible ($\Delta w/B_o$) de 1/150 et de 1/300.

2.1.2- Les essais :

Suite à l'interrogation sur les différentes couches en profondeur ainsi que la profondeur de la nappe, nous pouvons indiquer la liste d'essais :

- . Impossibles à réaliser ou inutiles
- . Recommandés.
- . Possibles.

Ce module a été mis en place suite à un synthèse des recommandations de différents auteurs [17-PHILIPPONNAT] [47-SANGLERAT,COSTET]. Une base de règles "ESSAI-SOL" permet finalement, de dégager une campagne d'essais. Le tableau suivant est un exemple de règles utilisées :

Extrait des règles utilisées.
(Essai-Sol)

SOL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ESSAI										
PRESSIONMETRE	O	O	M	O	O	O	O	O	O	O
PENETROMETRE (statique)	N	N	O	M	N	M	N	O	O	N
PENETROMETRE (dynamique)	N	O	N	N	O	O	O	O	N	O
PENETROMETRE (STAT-DYNA)	N	O	O	O	O	O	O	O	M	M
SCISSOMETRE	N	N	O	O	N	N	N	O	O	N
TRIAXIAL	-	-	O	O	O	M	M	O	O	M
BOITE	-	-	O	O	M	O	O	O	M	O
COMPRESSION (simple)	-	O	N	N	O	M	M	M	M	M
OEDOMETRE	-	-	O	O	O	M	M	O	O	M

SOL

O : Essai recommandé.

M : Essai possible mais l'interprétation est à faire avec précautions.
Essai difficilement traversant.

N : Essai impossible à réaliser.
Essai inutile.

- 1 Roche dure.
- 2 Roche altérée.
- 3 Argile molle.
- 4 Argile moyennement consistante
- 5 Argile très consistante
- 6 Sable argileux.
- 7 Sable et gravier.
- 8 Limons
- 9 Vases et tourbes.
- 10 hétérogène.

2.2- Le prédimensionnement :

Le prédimensionnement concerne les semelles filantes, isolées ou les radiers. la méthode retenue est celle des bielles qui consiste à supposer que les charges appliquées aux semelles par les points d'appuis (murs, poteaux...) sont transmises au sol (ou aux pieux) par des bielles obliques. Les semelles sont supposées centrées assurant sur le sol une pression supposée uniforme.

Les cas traités sont :

- . Semelles isolées sous poteaux.
- . - filantes sous murs ou voiles.
- . - sur 2, 3, ou 4 pieux.

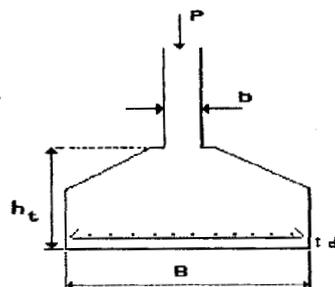
La semelle est dimensionnée de manière à respecter la condition de non-poinçonnement et la condition de rigidité. Ainsi, pour une semelle isolée rectangulaire, la surface minimale est calculée de telle manière que :

$$S > P/q_{ad}$$

où q_{ad} = contrainte admissible.
et P = charge appliquée.

On vérifie alors, la condition de non poinçonnement et la condition de rigidité :

$$L.B > P/q_{ad} \quad L/l = B/b$$
$$(h_t - d) > 0.25(B-b) \text{ avec } h_t > 25 \text{ cm.}$$



Pour la condition de non-poinçonnement , nous utilisons la formule simplifiée de Caquot [48-FUENTES]

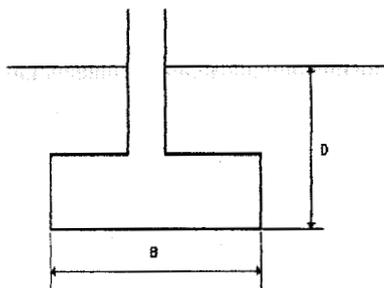
$$h_t - d > 1.44 \sqrt{p/\sigma'_{bo}}$$

où σ'_{bo} = contrainte admissible en compression du béton.

2.3- Evaluation de la portance :

Les méthodes de calcul de la portance dépendent du type de la fondation : superficielle, semi-profonde, profonde. Cette classification est précisée dans le D.T.U 13.12 [18].

fig 11- Classification des fondations d'après le D.T.U 13-12

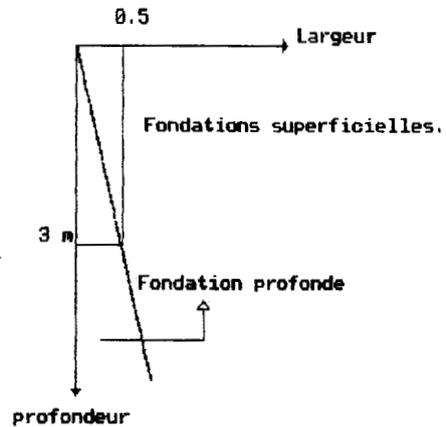


$$D/B < 6 \text{ m}$$

$$D < 3 \text{ m}$$

}

Fondation superficielle.



2.3.1- Fondations superficielles :

Les méthodes développées ci-dessous sont applicables aux travaux de fondation superficielle en béton armé constituée par des semelles isolées, des semelles filantes, des radiers généraux et des massifs semi-profond (puits courts).

Le D.T.U 13.1 développe des méthodes de calcul de la portance su sol. Les valeurs données par les formules du D.T.U correspondent à la rupture du sol. Il y a lieu d'appliquer un coefficient de sécurité (F_{por}) permettant d'avoir les contraintes admissibles. Ce coefficient de sécurité représente le rapport de la portance du sol (q_d) sur la contrainte appliquée notée (q_{app}). La valeur de F_{por} est généralement de 3 mais peut en être supérieure.

Nous vérifions que : $\frac{q_d}{q_{app}} > 1$, nous indiquons la valeur du rapport q_d/q_{app} , et offrons la possibilité de modifier les paramètres de conception directement liés au calcul de la portance du sol.

Les hypothèses générales :

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">. CAS BIDIMENSIONNEL. CHARGE VERTICALE, CENTREE. FONDATION RIGIDE |
|---|

A partir de ces hypothèses et d'autres propres à chaque cas, nous avons construit une bibliothèque de procédures de calcul de la portance :

Essai TRIAXIAL ou à la BOITE	[Sol homogène et naturel. - purement cohérent. - stratifié. - très compressible. - homogène d'épaisseur limitée. - Bicouche.
Essai de COMPRESSION SIMPLE	[Sol purement cohérent anisotrope. - - - homogène. - - d'épaisseur limitée.
Essai au PRESSIOMETRE	[Sol homogène. - hétérogène.
Essai au PENETROMETRE STATIQUE	[Sol homogène, purement cohérent. - , naturel.

Pour un type de fondation donnée, la portance est évaluée pour un couple ESSAI-SOL. Nous avons appliqué les méthodes proposées par le D.T.U 13.1 à chaque fois que les hypothèses nécessaires sont vérifiées. Certains cas traités ne relève pas du D.T.U, nous exposons ici le cas où le sol est composé d'un bicouche qui couvre un ensemble de cas traités à partir des essais de laboratoire ainsi que le principe retenu pour les essais in-situ (les autres cas traités sont développés en annexe 2).

A- Essais de LABORATOIRE

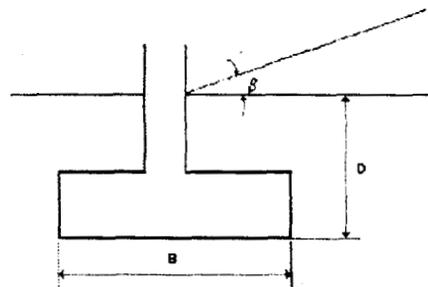
Le calcul de la portance des fondations à partir des essais de laboratoire consiste à appliquer au sol la théorie de la plasticité. Cette méthode implique la connaissance des caractéristiques C (la cohésion) et ϕ (l'angle de frottement interne) du sol. Elle nécessite donc l'exécution d'essais de laboratoire.

- La pente du terrain :

 Le calcul n'est fait que dans le cas où la pente du terrain est faible ($\beta < 20^\circ$).
 Pour le coefficient α qui intervient dans le calcul de la portance, nous retenons l'approximation :

$$\alpha = 1 - 0.03 \beta$$

β en degrés. [49-HABIB]



- Facteurs de TERZAGHI :

 Coefficient lié à la profondeur : $N_q = e^{[\pi \cdot \tan(\phi)]} \cdot [\tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2})]^2$
 - lié à la cohésion : $N_c = (N_q - 1) / \tan(\phi)$
 - à la surface : $N_\gamma = 1.80 (N_q - 1) / \tan(\phi)$

- Epaisseur de la couche :

 La profondeur minimale (H_{min}) en dessous de laquelle le sol peut être considéré comme d'épaisseur infinie varie avec ϕ et la largeur de la fondation. La relation $f(\phi) = H_{min}/B$ a été proposée par GIROUD et al. [50]. Nous retenons l'expression proposée par [3-BOISSIER] pour l'approximation de la relation précédente :

$$H_{min}/B = 0.6894 e^{(1.4685 \tan(\phi))}$$

La capacité portante est donnée par la formule suivante dans la cas d'un sol homogène, naturel :

$$q_d = \alpha (C \cdot N_c + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma + \gamma \cdot D \cdot N_q)$$

- Le sol est un BICOUCHE :

Ce cas pose un problème si la couche inférieure a des caractéristiques mécaniques inférieures à celles de la couche supérieure. Nous retenons la méthode de TCHENG [16-OLIVARI], :

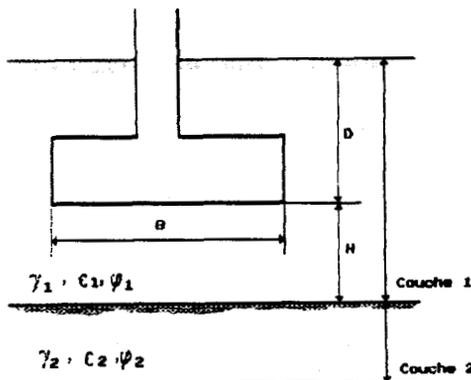


fig 12- Cas d'un sol "Bicouche".

- Si $H/B < 1.5$: la semelle poinçonne la couche supérieure, le calcul est réalisé en admettant que la semelle repose sur la couche inférieure dont la cohésion est légèrement améliorée. On pourra appliquer la formule :

$$q_d = \gamma_2 D + C_2 (2+\pi)/(1-0.3(H/B))$$

- Si $H/B > 3.5$: On néglige l'influence de la couche inférieure, et on suppose qu'on est en présence d'une couche infinie dont les caractéristiques sont celles de la couche supérieure. Dans ce cas :

$$q_d = \alpha (C_1 . N_c + 0.5 . \gamma . B . N_\gamma + \gamma . D . N_q)$$

où

α : coefficient dépendant de la pente du terrain.
 $= 1 - 0.03\beta$ avec β en degrés.

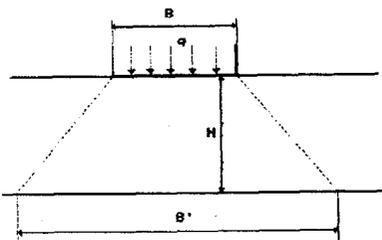
C : La cohésion du sol en Kpa.

B : Largeur de la fondation en mètres.

D : Profondeur d'ancrage en mètres.

N_c, N_γ, N_q sont les coefficients de TERZAGHI.

- $1.5 < H/B < 3.5$: Dans ce cas, on utilise la méthode approchée de la semelle fictive, en admettant que les contraintes verticales transmises par la semelle s'épanouissent dans la couche supérieure avec une répartition de 2/1. Concrètement, nous considérons que la couche supérieure supporte une semelle de largeur fictive $B' = B + H$ qui exerce une contrainte verticale $q' = q . B / B' + \gamma_2 H$



Remarque :

 Les méthodes de calcul développées précédemment concernent les semelles filantes. Ces méthodes sont valables pour les semelles isolées en multipliant le terme de surface par $(1 - 0.03 . B/L)$ et le terme de cohésion par $(1 + 0.2 B/L)$.

Exemple :

 Pour une semelle isolée (1.2x0.6) reposant sur un sol bicouche à une profondeur $D = 1.20$ m.

couche supérieure : $C_1 = 25$ Kpa
 $\phi_1 = 15$ degrés
 $\gamma_1 = 20$ Kn/m³
 $H = 2$ mètres

couche inférieure : $C_2 = 10$ Kpa
 $\phi_2 = 20$ degrés
 $\gamma_2 = 20$ Kn/m³

Nous indiquons la valeur de la portance calculée à partir de la méthode de Tcheng, et les valeurs trouvées avec les autres hypothèses :

portance semelle - essai triaxial ou boîte -

1 Le sol est composé d'une couche
 2 Le sol est un BICOUCHE
 3 est STRATIFIE
 4 couche d'épaisseur limitée

votre choix : 2

donnez le numero de la premiere couche : 10
 - - de l'essai triaxial : 1
 deuxieme couche : 11
 - - de l'essai triaxial : 2

semelle sur "bicouche"

portance (couche sup) : 343.07 Kpa
 - (couche inf) : 235.10 Kpa

portance (méthode de TCHENG) :

fonction du rapport $\left[\frac{H}{B} = 2.3 \right] = 276.61$ Kpa

fig 13- Liberté d'action retenue.

dans le tableau suivant nous présentons les informations que doit posséder l'utilisateur pour utiliser ces méthodes :

Essai TRIAXIAL ou à la BOITE			Essai de COMPRESSION		Essai IN-SITU	
homogène	stratifié	bicouche	cohérent anisotrope	cohérent		
C	C C	C { couche sup. ϕ γ	C_{uv}	C	pénétromètre	Pressionmètre
ϕ	ϕ ϕ		C_{u45}		R_p	$P_1 - P_0$
γ	γ	ϕ { couche inf. γ C	C_{uh}		(résistance de pointe)	(pression limite)
	$c \cdot \tan \phi = \bar{c} \cdot \tan \bar{\phi}$		γ		γ	γ
					(valeurs déduites de la courbe d'essai, fonction de la profondeur.)	

tab 1- Informations relatives à chaque essai.

B- Essais IN-SITU :

Cette deuxième approche consiste à appliquer des méthodes empiriques basées sur l'interprétation directe des essais in-situ (PRESSIOMETRE ou PENETROMETRE).

Le problème qui se pose dans ce cas est que les essais ne sont pas réalisés à l'endroit où les fondations vont être posées. Nous avons développé un programme de génération d'une courbe fictive (pénétrométrique ou pressiométrique) à partir des courbes d'essais réalisés. Deux cas sont envisagés :

- . L'utilisateur indique, lui même, l'essai à partir duquel il souhaite réaliser l'évaluation de la portance.
- . L'utilisateur préfère générer une nouvelle courbe à partir de plusieurs essais réalisés.

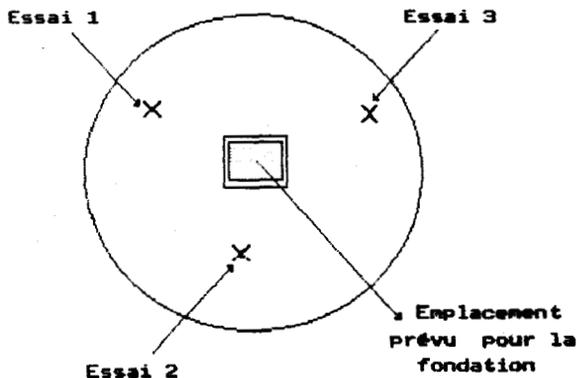
Supposons que trois essais pressiométriques ont été réalisés. L'utilisateur, pour évaluer la portance de la semelle indiquée (fig 14), préfère combiner les résultats de ces trois essais. La pression limite de cette nouvelle courbe, ainsi que le module pressiométrique sont calculés à partir de la moyenne géométrique des valeurs mesurées avec les trois essais à la même profondeur :

à chaque profondeur : $p_{1*} = \sqrt[3]{p_{11} \cdot p_{12} \cdot p_{13}}$?

où p_{1*} représente la valeur de la pression limite, à la même profondeur, pour la courbe générée.

p_{1i} : pression limite déduite de la courbe i. (essai i).

fig 14- Position des essais réalisés par rapport à l'implantation de la fondation.



essai "fictif" numero : 4 génééré à partir des essais : 1/2/3		
profondeur (mètres)	Epressio (Kpa)	pl-p0 (Kpa)
*****	-----	-----
0.5	0.0	0.0
1.0	4900.0	540.0
1.5	3200.0	360.0
2.0	2100.0	230.0
2.5	2300.0	230.0
3.0	2500.0	250.0
3.5	2600.0	270.0
4.0	2800.0	290.0
4.5	3700.0	550.0
5.0	9800.0	1100.0
5.5	9800.0	1200.0
6.0	11500.0	1400.0
6.5	10000.0	1250.0
7.0	9000.0	1150.0
7.5	8000.0	800.0
8.0	7000.0	600.0

fig 15- Courbe générée à partir de 3 essais

Concernant l'essai pressiométrique, nous utilisons les formules proposées par MENARD [51] pour les sols homogènes et les sols hétérogènes (annexe 3).

Dans le cas d'un essai pénétrométrique, les formules de MEYERHOFF et l'HERMINIER ont été retenues [16-OLIVARI] :

- . Pour les sols purement cohérents : la résistance de pointe du pénétromètre permet de déterminer la cohésion non drainée $C_u = (R_p - \sigma_o) / 10$ avec $\sigma_o = \gamma \cdot D$
- . Dans le cas des sols homogènes naturels : nous avons préféré l'utilisation des abaques de MEYERHOFF (qui donnent directement la valeur de la contrainte admissible) à la déduction de l'angle de frottement interne.

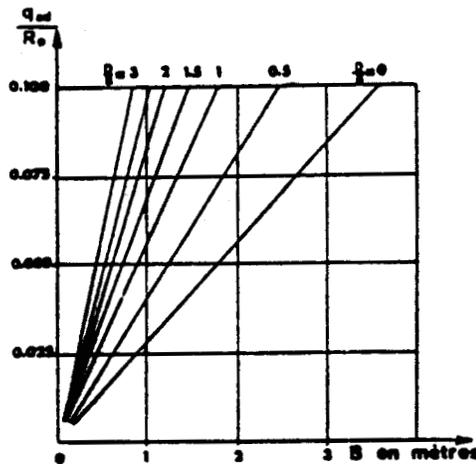


fig 16- Abaques de meyerhoff.

Dans le tableau suivant nous présentons les informations que doit posséder l'utilisateur pour utiliser ces méthodes :

Essai classique	Essai IN-SITU	
	pénétromètre	Pressionmètre
Φ : angle de frottement interne.	R_p (résistance de pointe)	$P_1 - P_0$ (Pression limite)
C : cohésion	γ	γ
γ : poids volumique des terres.	(valeurs déduites de la courbe d'essai, fonction de la profondeur.)	
couche supérieure et couche inférieure.		

tab 2- Informations relatives à chaque essai.

2.3.2- Fondations profondes :

En général, on n'emploiera des fondations profondes que lorsque les fondations superficielles révèlent insuffisantes pour assurer la portance.

Il s'agit d'ouvrages de grand élancement tels que le rapport (D/B) est supérieur à 6 [20-DTU]. L'effet de portance résulte du cumul de la résistance de pointe et la résistance de frottement latérale.

Les pieux sont classifiés en 2 groupes :

- groupe I : . pieux forés et micropieux de type I.
- groupe II : . pieux battus.
- . pieux vissés moulés.
- . pieux injectés sous hautes pression.

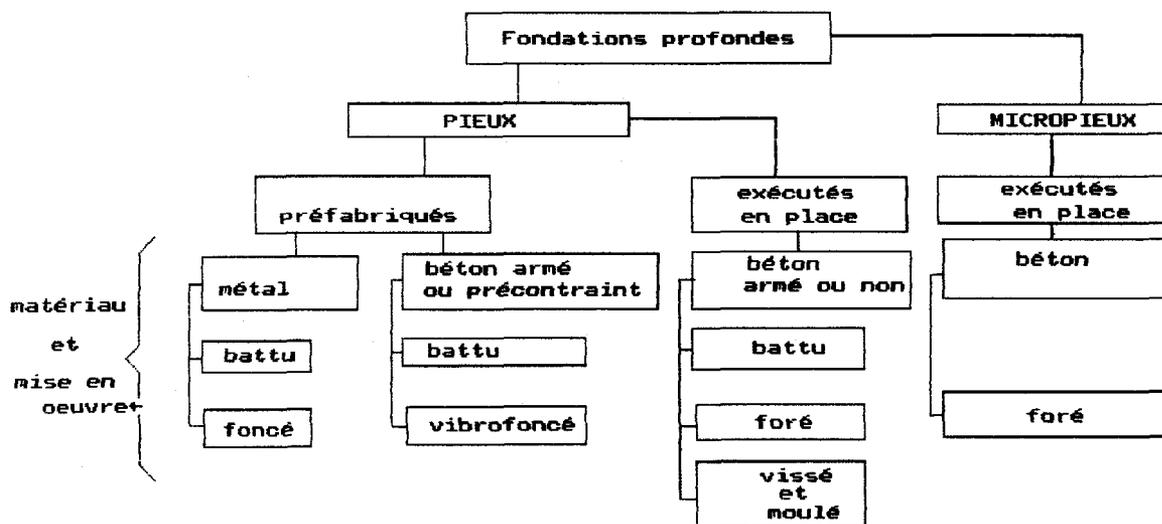


fig 16- classification des pieux.

Les hypothèses retenues dans tous les cas traités sont:

- . La charge exercée sur le pieu est verticale et centrée.
- . $D/B > 6$
- . La portance est exprimée sous la forme d'un effort de pointe et un effort de frottement latéral

$$\text{Portance : } q_d = q_p + q_f$$

où

q_p représente le terme de pointe.
et q_f - - - - - frottement latéral.

L'effort limite sera notée $Q_d = Q_p + Q_f$

- . Un coefficient de sécurité de 3 pour l'effort de pointe et un coefficient de sécurité de 2 pour le frottement latéral, pour le calcul de la Charge Nominale.

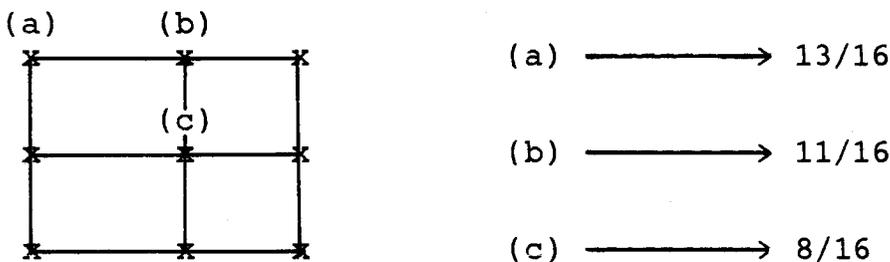
Les cas traités sont :

Essai de laboratoire	[	Sol naturel homogène d'épaisseur infinie. Sol homogène purement cohérent. Sol Bicouche.
Pressiomètre	[	Sol naturel homogène d'épaisseur infinie. Sol homogène purement cohérent. Sol multicouche.
Pénétromètre Statique	[	Sol homogène naturel d'épaisseur infinie. Sol homogène purement cohérent. Sol multicouche.

Portance d'un groupe de pieux :

C'est le problème d'un ensemble de pieux liaisonnés en tête par une semelle (ou longrine) rigide. Dès que l'entraxe de 2 pieux est inférieure à 1/10 de leur longueur, la capacité portante de chacun des pieux est diminuée. Cette diminution dépend en réalité de la taille de chaque pieu, de la forme du groupement et de la nature du terrain.

Pour estimer cette diminution ,nous retenons la méthode de "FELD" [47-SANGLERAT]. On admet que chaque pieu a pour charge portante, la charge portante d'un pieu isolé diminuée d'autant de fois 1/16 de sa valeur qu'il y a de pieux voisins :



Nous ne prétendons pas résoudre les problèmes liés au comportement d'un groupe de pieux, en effet même si cette méthode implique une correction de la force portante, son inconvénient est qu'elle ne tient pas compte du type de fondation et du mode d'exécution.

Cette méthode est utilisée dans les deux cas suivants :

$$\text{ou} \quad \begin{array}{l} \text{entraxe} < D/10 \\ \text{entraxe} < 3.\phi \end{array}$$

A- Essais de LABORATOIRE :

Les méthodes de calcul à partir des essais de laboratoire reposent sur la détermination des caractéristiques de cisaillement :

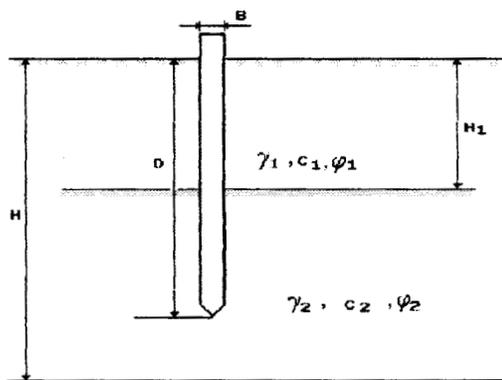
- . Caractéristiques effectives : C', ϕ' pour les sols pulvérulents.
- . Caractéristiques apparentes : C_{uu} (associé à ϕ_{uu}) pour les sols purement cohérents.
- . C_u, ϕ_u pour les sols intermédiaires.

Ces méthodes de calcul font intervenir la profondeur critique D_c (ancrage à partir de laquelle la contrainte à la rupture sous la pointe atteint une valeur constante). Notons que d'une manière générale cette profondeur est atteinte par les fondations profondes.

Nous détaillons ici le cas où le sol est composé d'un bicouche, car il fait appel aux méthodes utilisées dans les autres cas.

- Le sol est un BICOUCHE :

fig 17- Pieu dans un "bicouche".



Plusieurs cas sont envisagés suivant les épaisseurs des couches, la longueur de la fiche et la hauteur critique.

a- $D < H_1$: Le calcul se fait avec la couche supérieure seule

Terme de pointe : $q_p = a \cdot N_{qmax} + \lambda \cdot C \cdot N_{cmax}$ [20]

où

$$a = 50 \text{ Kpa}$$

$$\lambda = 1.3 \text{ (pieu circulaire).}$$

$$q_p = 50 \cdot N_q + 1.3 \cdot C \cdot N_c$$

avec

$$N_{qmax} = e^{(7 \cdot \tan(\phi))}$$

$$N_{cmax} = (N_{qmax} - 1) / \tan(\phi)$$

$$\text{et } Q_p = q_p \cdot \pi \cdot B^2 / 4$$

Terme de frottement latéral :

Le frottement latéral s'écrit sous la forme :

$$Q_f = Qf_c + Qf_p$$

La méthode utilisée est celle de KERISEL

$$Qf_p = 0.5 \cdot \gamma \cdot D \cdot f_p(\phi) \cdot \pi \cdot B \cdot D$$

$$\text{avec } f_p(\phi) = 0.062 e^{(6.672 \cdot \phi)} \quad [3]$$

ϕ en radians.

$$Qf_c = \pi \cdot B \cdot D \cdot C \cdot f_c(\phi)$$

$$\text{avec } f_c(\phi) = (1 + \sin \phi) e^{(\pi + \phi) \cdot \tan(\phi)}$$

b- $H_1 < D < H$: Soit D_c la hauteur critique calculée à partir de la couche inférieure seule :

si $D > D_c$: L'effort de pointe est exprimé uniquement avec les caractéristiques de la couche inférieure

$$q_p = a \cdot N_{q2} + \lambda \cdot C_2 \cdot N_{c2}$$

si $D < D_c$: La portance est interpolée en fonction de D entre la portance q_{sup} et la portance q_{inf} :

q_{sup} étant la portance due à la couche supérieure si la fiche était H_1 , calculée à partir de $C_1, \gamma_1, H_1, \phi_1$.

q_{inf} est la portance de la couche inférieure

$$D'ou \ q_p = q_{sup} + (q_{inf} - q_{sup}) \cdot (D_c - H_1) / (D - H_1)$$

Le terme de frottement est la somme des termes dus à chacune des couches traversées.

B- Essais IN-SITU

Le principe de liberté de choix d'essai pour faire l'évaluation ou la combinaison de plusieurs essais réalisés est encore adopté (le même principe que pour les fondations superficielles).

Essai pressiométrique : Dans ce cas nous utilisons les formules proposées par MENARD [51] :

$$\text{Terme de pointe : } q_p = \gamma \cdot D + k(P_1 - P_0)$$

$$Q_p = q_p \cdot \pi \cdot B^2 / 4$$

Terme de frottement latéral : Il est déduit des abaques de MENARD. Le frottement du bulbe près de la base est pris sur une hauteur de 3 diamètres B. Le frottement latéral en section courante du fût est pris sur une (H-3B).

L'approximation des abaques est faite sous la forme :

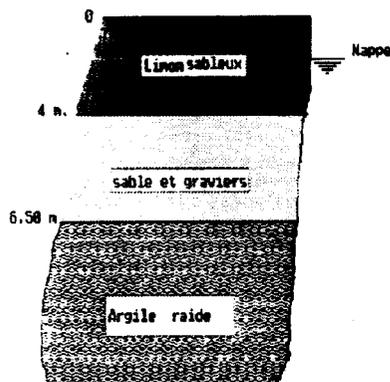
- . Au contact du bulbe: $f_b = -0.6 + 19.76(P_1 - P_0) - 0.86(P_1 - P_0)^2 - 0.5217(P_1 - P_0)^3$
- . Au contact du fût : $f_f = -2.3 + 16.1(P_1 - P_0) - 1.157(P_1 - P_0)^2 + 0.02(P_1 - P_0)^3$

avec $(P_1 - P_0)$, f_b et f_f en Kpa.
 et $f_b < 120$ Kpa
 $f_f < 81$ Kpa

$$Q_f = [f_f \cdot (D - 3B) + (f_b \cdot 3B)] \cdot \pi \cdot B$$

exemple :

L'utilisation de la courbe générée précédemment, pour un pieu foré dans un sol composé de trois couches (fig 18-a) permet de calculer la capacité nominale du pieu et qui est présentée sous forme d'un terme de frottement latéral et un terme de pointe (fig 18-b) :



-a-

RESULTAT TRAITEMENT			

Pieu foré à tube battu			
DIAMETRE	PIEU :	0.60 m	
PROFONDEUR	- :	9.5 m	
CONT APPLIQUEE	:	813.46 Kpa	Charge nominale : 1045 Kn
Capacité Nominale	:	3696.62 Kpa	terme de frottement : 744 Kn
			terme de pointe : 301 Kn
MODIFICATION (O/N) :			

-b-

fig 18- Utilisation de la méthode pressiométrique.

Essai pénétrométrique : Nous avons adopté la méthode de GIANESELLI et BUSTAMANTE décrite au D.T.U 13.2 [20] et [52-BUSTAMANTE].

Notons que les valeurs du coefficient de portance pénétrométrique (K_c) sont en moyenne 2 fois inférieures à celles présentées par le document FOND 72 [53]. En effet les valeurs proposées par BUSTAMANTE et GIANESELLI oscillent entre 0.2 et 0.55 et celles proposées au FOND 72 sont comprises entre 1.0 et 0.7 (voir annexe 3).

2.4- Evaluation du tassement :

Le tassement sous fondations, lié à la compressibilité du sol fait l'objet de nombreux traités dans la littérature spécialisée. Il n'est donc pas question de reprendre fondamentalement la question mais de rechercher les moyens de calculer les tassement des cas les plus courants qui se présentent dans la pratique. Rester à la fois suffisamment général pour couvrir un maximum de cas, et simple pour intégrer ce travail dans notre modèle, tel était notre philosophie.

La réalisation de ce travail a demandé une analyse générale du tassement, et une analyse ponctuelle des méthodes retenues.

. Analyse générale :

La construction d'un ouvrage amène souvent à considérer différents types de tassements pouvant intéresser le concepteur lors de l'élaboration de son projet :

- 1- Le tassement induit par l'ouvrage sur d'autres ouvrages existants.
- 2- Le tassement global de l'ouvrage vis-à-vis de la plateforme d'implantation.
- 3- Les tassements des différents éléments de fondation et le tassement différentiel entre les éléments voisins.

Nous nous intéressons aux tassements du troisième genre.

. Classification des fondations :

Le calcul de tassement sous les fondations dépend de nombreux paramètres comme la nature du sol, le type de charge repris par l'élément porteur ainsi que la modélisation retenue pour la fondation.

La classification des fondations est la même que pour le traitement de la portance et en cohérence avec le schéma conceptuel. Le comportement des fondations qui peut être, soit rigide, soit flexible est pris en compte dans certains cas et

quand la méthode de calcul le permette. Notons que d'une manière générale, les semelles sont considérées comme des fondations rigides et que les radiers se trouvent dans une position intermédiaire entre les fondations rigides et les fondations souples.

. Méthodes de calcul du tassement :

On distingue généralement, 3 types de méthodes:

- Méthode directe :

Cette méthode, dite méthode globale du module de réaction du sol, est basée sur la théorie de l'élasticité linéaire, elle suppose que le sol est homogène et que le module d'élasticité du sol (E) ainsi que le coefficient de poisson (ν) peuvent être considérés comme constantes en tout point du sol. La théorie de l'élasticité permet de relier la contrainte appliquée (q) au tassement (W) par l'intermédiaire d'un coefficient K (module de réaction du sol)

$$W = f \frac{1 - \nu^2}{E'} \cdot B \cdot q \quad \text{et} \quad q = K \cdot W$$

q : pression appliquée.
B : Largeur de la fondation.
 ν : coefficient de poisson.
E' : module d'élasticité drainé du sol.

f est un coefficient qui dépend de la forme de la semelle, de sa rigidité et pour les structures souples de la position du point considéré. L'hypothèse générale adoptée est que les semelles sont rigides. Giroud [54] propose des abaques pour le calcul de f, nous avons adopté l'approximation suivante pour les semelles isolées rectangulaires:

$$f = 0.093023 (L/B)^{0.36282}$$

Pour les semelles filantes, nous utilisons la formule proposée par Giroud [54], valable pour une semelle souple de grande longueur. Pour rester homogène avec l'hypothèse de semelle rigide, le tassement de la semelle rigide est estimé à partir du tassement moyen de la semelle supposée souple :

$$W = W_m = P_m \frac{1 - \nu^2}{E} B \cdot q$$

avec $\alpha = L/B$ (L, B : longueur et largeur de la semelle)

$$P_m = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\text{Log}(\alpha + \sqrt{1 + \alpha^2}) + \alpha \cdot \text{Log}\left(\frac{1 + \sqrt{1 + \alpha^2}}{\alpha}\right) \right) + \frac{1 + \alpha - (1 + \alpha^2)^{3/2}}{3 \cdot \alpha}$$

Nous présentons dans la figure suivante, une comparaison des valeurs adoptées à celles proposées par Giroud et Philipponnat :

Semelle rectangulaire rigide de côté L ,B (L/B)	Réf.[54]	Réf.[17]	Approximation
	valeur de f		

1	0.88	0.87	0.88
1.2	0.96	0.94	0.99
1.4	1.03	-	1.05
1.6	1.1	1.07	1.1
1.8	1.16	1.13	1.15
2	1.21	1.18	1.195
2.5	1.33	-	1.30
3	1.43	1.4	1.39
4	1.59	1.57	1.54

semelle filante (L/B)	Valeur de f pour le tassement moyen	
----------------------------	-------------------------------------	--

5	1.83	1.82
10	2.246	2.25

fig 19- Valeurs du coefficient f pour le calcul du tassement (Méthode globale).

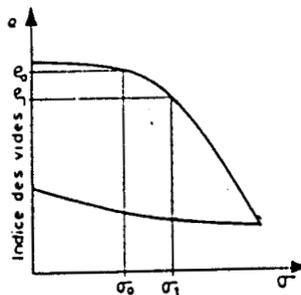
- Méthode indirecte :

Assez fiable mais lourde de mise en oeuvre, nécessitant de nombreux calculs, en effet, on calcule les contraintes dans le sol le long d'un axe vertical issu du point de la surface du sol dont on désire calculer le tassement. Le sol est ensuite divisé en couches, le tassement de chaque couche est alors calculé compte tenu de ses propriétés mécaniques et des contraintes qui y règnent. La somme des tassements ainsi calculés est le tassement du point considéré.

Cette méthode nécessite l'exécution d'un ou plusieurs essais oedométriques en laboratoire (annexe 4) :

$$w = \text{tassement} = \sum_1^n w_1 \quad \text{avec} \quad w_1 = H_1 \frac{\Delta e}{(1+e_0)}$$

La valeur de Δe est déduite directement de la courbe oedométrique



- Méthode pressiométrique :

Cette méthode est basée sur l'interprétation de la courbe pressiométrique [51-MENARD]. Elle est adaptée pour les sols homogènes et les sols à faible hétérogénéité; Dans ce dernier cas, le sol sous la fondation sera découpé en tranches d'épaisseur B/2 (fig 20)

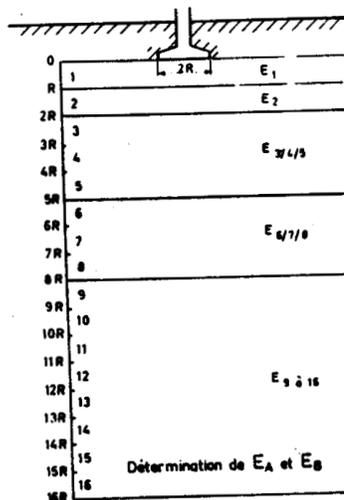


fig 20- Découpage du sol sous la fondation
-méthode pressiométrique-(ref [51]).

Pour les sols homogènes :

$$w = \frac{1.33}{3.E} q.R_o. \left(\lambda_2 \frac{R}{R_o} \right)^\alpha + \frac{\alpha}{4.5E} q.\lambda_3.R$$

où q = contrainte appliquée
 nous prenons $\nu = 0.33$
 R_o = rayon de référence = 30 cm.
 R = demie-largeur de la semelle = $B/2$
 = coefficients de forme de la semelle

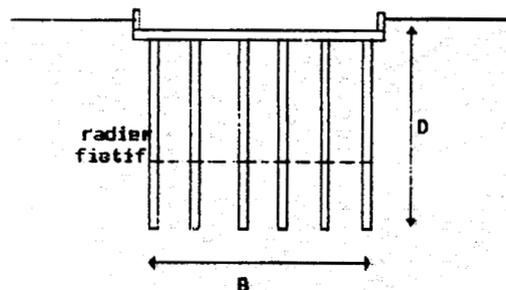
Pour les sols hétérogènes :

$$w = \frac{1.33}{3.E_B} q.R_o. \left(\lambda_2 \cdot \frac{R}{R_o} \right)^\alpha + \frac{\alpha}{4.5E_A} q.\lambda_3.R$$

Cette méthode est développée en détail dans l'annexe 4.

- Tassement des pieux :

L'expérience montre que sous les charges nominales le tassement total des pieux isolés est compris entre quelques millimètres et 2 cm au maximum [17-PHILIPPONNAT]. La complexité de transmission des charges du pieu au sol fait que, dans la pratique, on calcule rarement le tassement d'un pieu isolé d'autant plus que les fondations profondes sont toujours réalisées par files ou groupe de pieux. L'expérience [16-OLIVARI] a aussi montré que le tassement du pieu isolé est plus faible que celui d'un groupe de pieux identiques supportant la même charge. Nous étudions donc seulement le tassement d'un groupe de pieux. Deux cas sont traités :



. Si les pieux travaillent essentiellement en pointe, on admet que le groupe se comporte comme une pile fictive fondée au niveau des pointes à la profondeur D .

. Si les pieux sont flottants, TERZAGHI a montré que la répartition des contraintes était la même que sous une pile fictive fondée au niveau $2/3 D$.

Le calcul du tassement se poursuit de la même manière que pour les fondations superficielles.

2.5- Evaluation économique :

Il s'agit d'évaluer des quantités et de proposer des coûts unitaires [55-BATIPRIX] en vue d'une évaluation du coût global.

Pour les fondations superficielles, les évaluations des quantités concernent [56-VENVIEN] :

- Volume de béton.
- Poids d'acier.
- Surface de coffrage.
- Volume des fouilles.

Deux niveaux d'évaluation des quantités d'acier sont prévus :

- . Une évaluation sommaire (par ratios).
- . Une évaluation détaillée (par avant-métrés).

L'estimation du volume du béton ne pose pas de difficulté. La surface de coffrage est évaluée dans le cas où un bétonnage en pleine fouille ne peut être réalisé (cette information supplémentaire est précisée par l'utilisateur lors de l'évaluation).

En ce qui concerne le poids d'acier, nous avons utilisé les formules proposées par LECOVEC [57] pour l'évaluation par ratios; Pour l'évaluation détaillée nous faisons appel aux règles du B.A.E.L 83 qui permettent le calcul de la section d'acier nécessaire (fig 21-a); le poids d'acier correspondant est alors estimé après majoration de la section calculée ; cette majoration est calculée pour tenir compte des arrêts de barres et des recouvrements.

Ainsi pour une semelle sur deux pieux, par exemple, la section d'armature principale A_s :

$$A_s = 1.1 N_s / (f_e / \gamma_s)$$

$$\text{ou } N_s = \frac{P_u}{8.d} (2.B-b) \quad [58-ALBIGES]$$

Ces évaluations sont possibles, élément par élément (fig 21-a) mais aussi globalement pour une partie ou la totalité d'éléments du projet (fig 21-b) :

ferrailage de la semelle sur 2 pieux numero : 10	

SECTION d'acier = 12.566 cm ² , soit 4 Φ 20	
	Φ 20 tous les 31.33 cm
armatures supérieures = 1.26 cm ²	
	soit 4 Φ 8
Cadres horizontaux = 4.40 cm ²	
	soit 5 Φ 12
Cadres verticaux = 4.40 cm ²	
	soit 11 Φ 8

surface de coffrage : 6.1 m ²	
volume du béton : 2.28 m ³	
poids d'acier : 123.00 Kg	
fouille : 3.4 m ³	

-a-

Evaluation globale de la partie	
composée de semelles filantes numéro : 7,8	
	sur 2 pieux - : 10
acier, coffrage, beton	

Bilan des quantités	

poids d'acier total	: 190.0 Kg
volume de béton -	: 9.826 m ³
surface de coffrage -	: 15.76 m ²
béton de propreté(5 cm)	: 54.5 m ²
volume total des fouilles	: 48.3 m ³

-b-

fig 21- Exemple d'évaluation économique.

L'évaluation des coûts des propositions est liée aux coûts unitaires utilisés. Le principe retenu est de proposer à l'utilisateur une liste des coûts unitaires des matériaux les plus couramment utilisés (fig 22). Les coûts unitaires actuellement proposés relèvent de BATPRIX 1988 [55].

fig 22- Exemple des coûts unitaires pour les éléments de fondation superficiels

les prix unitaires proposés		

1	P.U coffrage (m ²)	= 98 F
2	P.U acier (tonne) H.A	= 10300
	P.U acier T.S	= 7100
3	fouille-rigole (m ³)	= 63
	Excavation (m ³)	= 96.00
4	béton (m ³)	= 650
5	propreté (m ²) -5cm-	= 42

CONCLUSION

L'étude technique des fondations nécessite une reconnaissance solide du sol. Sans reprendre fondamentalement le problème de la campagne d'essais, quelques réponses pratiques à ce problème viennent d'être exposées.

méthodes proposées par la réglementation, et si certains cas développés ne relèvent pas des DTU elles sont couramment utilisées. L'ensemble de cas pratiques offerts à l'utilisateur lui donne la possibilité de choisir la méthode qui lui semble adaptée à son projet.

L'utilisation de l'évaluation sommaire est adaptée à une phase où les dimensions des éléments du système de fondation n'ont pas été confirmées, en effet l'évaluation économique détaillée est sans intérêt à ce stade. Notons enfin que l'évaluation économique peut jouer un double rôle : celui de la préparation à l'étude de prix et celui de la comparaison de plusieurs variantes.

3- L'aide à la décision vis-à-vis d'objectifs flous.

Nous avons présenté au 2ème chapitre, les méthodes capables de tenir compte de l'incertitude. Le domaine d'application de notre étude fait intervenir plusieurs sources d'incertitudes sur les valeurs des évaluations techniques nécessaires à la validation d'une proposition. Nous présentons dans ce chapitre la méthode utilisée pour l'aide au choix d'une solution parmi un ensemble de solutions possibles.

3.1 - Problématique de la décision :

Le but du décideur dans notre champ d'application est d'avoir une solution techniquement admissible (stabilité et tassement) et qui soit la moins chère possible. Ceci représente son objectif global. Cet objectif global est décomposé en plusieurs sous-objectifs composés de plusieurs objectifs élémentaires associés à des critères réglementaires ou non. La performance de chaque proposition selon chaque objectif nécessite l'évaluation du critère correspondant.

La définition d'un objectif associé à un critère dépend essentiellement de deux points (fig 23) :

- 1- La réglementation,
- 2- Le degré de fiabilité accordé à l'évaluation du critère.

En effet, si le décideur juge satisfaisante la fiabilité d'évaluation d'un critère donné, son objectif peut être formulé de manière à ce que la réglementation soit respectée. Par contre, s'il estime que l'évaluation n'est pas fiable, il ne peut se contenter d'un respect de la réglementation et l'objectif associé sera plus strict.

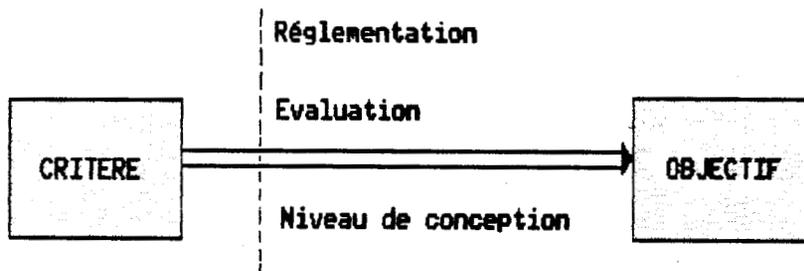


fig 23- Le passage du critère à l'objectif.

Comme il a été dit précédemment, plusieurs sources d'incertitude sont impliquées lors des évaluations des critères pris en compte, elles dépendent à la fois du niveau de conception retenu, et de la nature du champ d'application (fig 23).

L'utilisation pratique des méthodes basées sur une étude statistique ou probabiliste suppose qu'on dispose, en ce qui concerne le sol par exemple, d'un nombre d'essais suffisant pour mener à bien cette démarche. Or, dans la majorité des projets de constructions d'habitation, le nombre d'essais réalisés est limité et insuffisant pour l'exploiter dans une démarche statistique ou probabiliste, d'autant que les budgets réservés à cette étude sont incapables de supporter le coût d'une reconnaissance satisfaisante de point de vue de la statistique.

La théorie des probabilités est appropriée pour décrire un processus stochastique : P(A) représente la probabilité que l'événement A soit réalisé alors que l'appartenance floue a été définie comme le degré d'appartenance d'un élément connu à une classe A dont les frontières sont mal définies. Une probabilité est estimée à partir d'expériences sur la réalité alors que l'appartenance floue traduit la croyance de l'expert en ce qu'il sait [59].

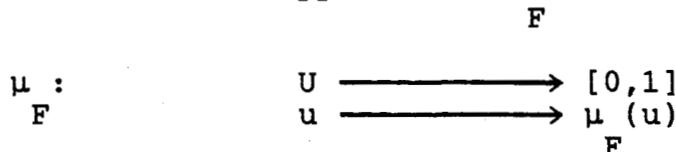
Les concepteurs, pour tenir compte de l'incertitude sur les évaluations des critères intéressant le projet, font intervenir des degrés de confiance qu'ils accordent à ces évaluations avant de prendre une décision et de dégager une ou plusieurs solutions possibles. L'utilisation d'une méthode basée sur la théorie des sous-ensembles flous permet de mieux cerner la fiabilité accordée aux évaluations des critères; cette opération se traduit par une spécification vague des objectifs.

L'utilisation de la méthode proposée au deuxième chapitre (Partie I) passe dans le champ de la conception de l'infrastructure par une définition :

- . des critères et des objectifs associés à ces critères,
- . du cadre d'intervention du décideur par ces préférences,
- . et d'une démarche d'agrégation.

3.2- Formulation des objectifs :

Etant donné que l'objectif associé à un critère, évalué d'une manière imprécise, peut être décrit par un ensemble flou; Le problème majeur est la détermination de la fonction d'appartenance associée à cet ensemble. Rappelons seulement qu'un sous-ensemble flou d'un ensemble U appelé référentiel, est défini par la donnée d'une application μ de U dans [0,1] :



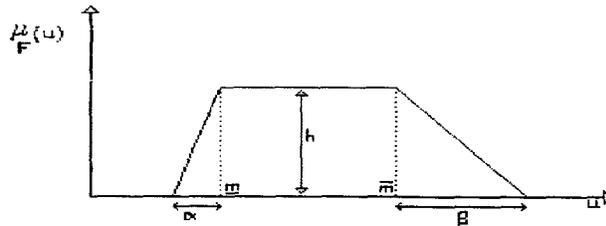
où

$$\begin{aligned} \mu_{\underline{F}}(u) = 1 & \implies u \in F \\ \mu_{\underline{F}}(u) = 0 & \implies u \notin F \end{aligned}$$

Plus $\mu_{\underline{F}}(u)$ se rapproche de 1, plus l'élément u a un degré d'appartenance à F élevé.

Hypothèse :

----- Nous supposons que les sous-ensembles flous manipulés sont du type L-R (voir première partie) et peuvent être représentés par des fonctions d'appartenance de forme trapézoïdale. Ils sont donc définis par la donnée de $(\underline{m}, \bar{m}, \alpha, \beta, h)$:



3.2.1- Estimation de la fonction d'appartenance :

Il n'existe pas de méthode générale permettant de construire la fonction d'appartenance associée à un sous-ensemble flou donné. La forme de cette fonction est subjective par nature. Elle dépend généralement du contexte. Nous présentons ici 2 techniques particulières d'estimation de la fonction d'appartenance :

a- Construction à l'aide de variables linguistiques :

Lorsque l'on connaît la valeur prise par μ sur un certain nombre d'éléments, on peut procéder par extrapolation pour étendre μ à l'ensemble. Le plus souvent, on connaît μ au travers de valeurs linguistiques. Il suffit de les transcrire en valeurs numériques appartenant à $[0,1]$ pour obtenir une fonction d'appartenance discrète.

b- Estimation statistique :

La disposition de données statistiques sur l'appartenance des éléments à un ensemble donné, permet l'estimation de la fonction d'appartenance d'un élément u à F par la proportion de l'appartenance de cet élément apparue dans la statistique. Ceci suppose que probabilité et appartenance floue

Cette technique est largement utilisée pour l'étude de la stabilité des structures (probabilité de ruine) et des fissurations des structures [60-MUNRO] [61-SHIRAISHI].

. Pour des raisons qui ont été évoquées ci-dessus, nous avons préféré la première technique de construction de la fonction d'appartenance.

3.2.2- L'objectif "STABILITE" :

a- Le critère :

Si les règles de calcul de la force portante d'une fondation sont bien précisées par le DTU (dans certains cas), le passage de cette pression limite à une contrainte admissible (ou taux de travail du sol) se fait par l'intermédiaire d'un "coefficient de sécurité". Ce coefficient de sécurité représente le rapport de la portance calculée (ou estimée) sur la pression appliquée sur la fondation :

$$F_{port} = q_d / q_{app}$$

avec q_d = Portance du sol.
 q_{app} = Contrainte appliquée.

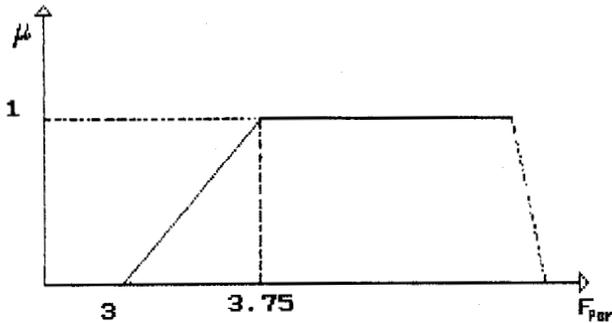
b- L'objectif :

Le coefficient de sécurité pris de l'ordre de 3 est à analyser cas par cas puisqu'il dépend du type de sol de fondation et de l'importance de l'ouvrage mais surtout du degré de fiabilité que le décideur accorde à la valeur de l'évaluation de la portance. On voit bien que l'objectif relatif à ce critère se traduit par une modulation du coefficient de sécurité.

Le décideur peut imposer une valeur minimale du coefficient de sécurité en dessous duquel la solution ne satisfait plus l'objectif en matière de stabilité, et une valeur de ce coefficient à partir duquel la satisfaction de l'objectif est totale. La mesure de cette satisfaction est faite à partir de la fonction d'appartenance en supposant que l'évolution est linéaire entre ces 2 valeurs extrêmes.

Prenons l'exemple où le décideur impose d'écarter les solutions qui ne représentent qu'un coefficient de sécurité de 3, et juge complètement satisfaisant des solutions avec un coefficient de sécurité de 3.75. Pour respecter l'hypothèse d'ensemble flou du type L-R, la représentation de cet objectif nécessite la connaissance de la valeur m , valeur maximale où la satisfaction est totale : le décideur peut donner une valeur très grande dépendant du domaine d'évaluation du critère (20 par exemple). Cet objectif sera représenté de la manière suivante : (3.75, 20, 0.75, 0, 1) -fig 24-

fig 24-



Pour $\mu=1$ il y a compatibilité totale entre la solution proposée et l'objectif "stabilité" (solution/ $q_d/q_{app} > 3.75$)

$\mu=0.75$ La solution est plutôt compatible.

$\mu=0.5$ La solution est moyennement compatible.

$\mu=0.25$ La solution est faiblement compatible.

$\mu=0$ La solution est incompatible.

Blokley et al. [62] définissent un objectif lié au critère de sécurité des structures (safety factor) de la manière suivante :

S.F	μ
1.1	0.1
1.3	0.3
1.5	0.8
1.7	1.0
2.0	1.0

c- Eléments pour la formulation de l'objectif :

Les éléments qui conditionnent cette formulation sont trop nombreux puisque les sources d'incertitude sur l'évaluation de ce critère (capacité portante) sont variées. L'incertitude sur les caractéristiques du sol qui ont permis d'évaluer la portance des fondations semble primordiale, ainsi nous utilisons le module de reconnaissance pour juger la compatibilité de l'essai réalisé avec la nature du sol de fondation et vérifions si la profondeur du sondage a atteint la profondeur minimale de reconnaissance (chapitre 1). L'utilisation des résultats du module de reconnaissance, en amont, permet d'aider le décideur à mieux préciser son objectif relatif au critère de stabilité (portance).

3.2.3- L'objectif "TASSEMENT" :

a- Le critère :

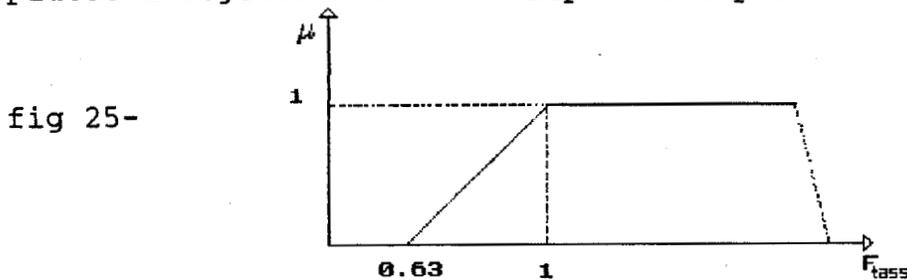
Les recommandations concernant le tassement des fondations varient d'un auteur à un autre. Les valeurs des tassements admissibles doivent faire l'objet d'une concertation entre le mécanicien du sol, l'architecte, et l'ingénieur des structures. La maquette réalisée (3ème partie), dans son état actuel, permet de faire le constat sur le tassement absolu des différents éléments composant le système de fondation, et indique les éléments du système dont les tassements dépassent les valeurs admissibles. C'est le tassement différentiel qui intéresse le plus les projets de bâtiments d'habitation; nous proposons un critère en tassement différentiel défini par le rapport du tassement admissible sur le tassement calculé:

$$F_{tass} = W_{adm}/W_{calc}$$

avec W_{adm} = Tassement différentiel admissible.
 W_{calc} = Tassement différentiel estimé.

b- L'objectif :

Les valeurs admissibles du tassement différentiel dépendent de la nature de la structure, ainsi pour les poutres en B.A : $L/400 - L/250$ (L représente la portée); une solution où le tassement différentiel est estimé à $L/400$ (ou inférieur) est une solution qui est parfaitement compatible avec cet objectif, tandis que pour un tassement de l'ordre de $L/250$ la solution est plutôt à rejeter. Ceci est représenté par :



$$\mu=1 \text{ si } (L/400)/W_{calc} = 1$$

$$\mu=0 \text{ si } (L/400)/W_{calc} \leq 0.63 \text{ ce qui correspond à une valeur du tassement différentiel(calculé) de } L/250.$$

Le décideur, pour définir cet objectif, fournit la valeur du tassement admissible en dessus duquel la satisfaction est totale, et la valeur en dessous duquel il y a non-satisfaction.

c- Éléments pour la formulation de l'objectif :

C'est encore le module de reconnaissance qui va aider le décideur à préciser l'allure de la fonction d'appartenance relative à l'objectif tassement. La compatibilité de l'essai réalisé avec la nature du sol de fondation et la

comparaison de la profondeur du sondage avec la profondeur minimale de reconnaissance (chapitre 2) permettent de mieux formuler la fiabilité accorder à l'évaluation du critère. L'éventuelle modification des charges apportées par la superstructure à la fondation ainsi que le degré d'homogénéité du sol, sont laissés à l'appréciation du décideur.

3.2.4- L'objectif "Coût" :

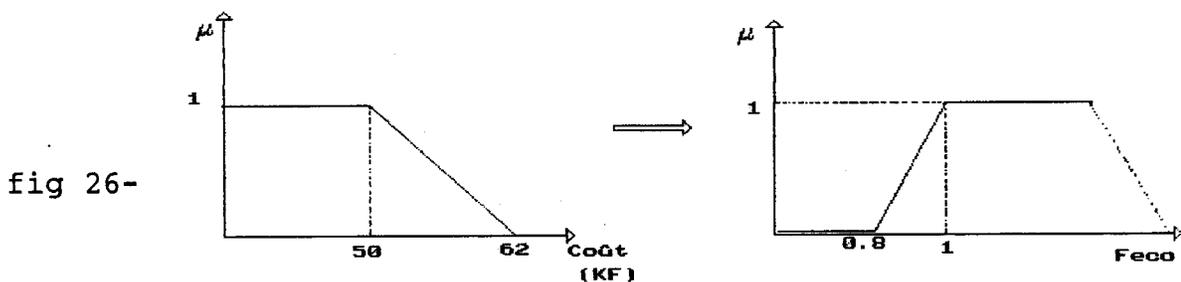
a- Le critère :

Ce critère intervient après élimination des variantes ne répondant pas à l'objectif "stabilité" ou l'objectif "tassement". Le projecteur a généralement une idée de l'enveloppe budgétaire réservée à l'affaire. Ce critère se traduit naturellement par le coût global de l'affaire, ou par le rapport du coût(envisagé) sur le coût(estimé). Nous avons préféré l'utilisation de ce rapport comme critère économique pour des raisons de compatibilité avec les autres critères :

$$F_{eco} = \text{Budget} / \text{coût(estimé)}$$

b- L'objectif :

Le décideur, comme pour les autres objectifs, fournit le coût en dessous duquel la satisfaction est totale (budget) et une marge éventuelle. Prenons l'exemple où le budget réservé à un projet est de 62 K.F, le décideur précise que les variantes dont le coût d'exécution ne dépasse pas 50 K.F sont parfaitement compatibles avec son souhait, et que celles qui dépassent 62 K.F sont à éliminer. Une représentation possible de l'objectif est illustrée par la figure 26



$\mu=1$ pour des solutions telles que le rapport du coût envisagé sur le coût estimé est égale à 1 ; cette valeur correspond à un coût estimé inférieure ou égale à 50 KF,

$\mu=0$ pour des solutions où le rapport F est égale à 0.8, ce qui correspond à une valeur du coût estimé de 62 KF environ (une majoration de l'ordre de 24 % sur la valeur de 52 KF).

c- Eléments pour la formulation de l'objectif :

Le décideur introduit la valeur du coût envisagé, valeur où la satisfaction est totale et la marge éventuelle exprimée en pourcentage du coût envisagé. L'utilisation de l'évaluation économique de la maquette est limitée à la comparaison de variantes de même type en effet, la comparaison de solutions de nature différentes (radier, pieux, semelles) demande une révision du coût estimé pour tenir compte des postes qui ne sont pas pris en compte.

3.2.5- Le rôle du décideur :

La qualité d'une variante, d'un point de vue technique, est déduite des performances de cette variante selon les deux sous-objectifs définis ci-dessus. L'objectif technique sera donc vue comme une combinaison de l'objectif "stabilité" et l'objectif "tassement", l'évaluation de la performance d'une variante selon cet objectif peut se faire à partir de l'opération MIN appliquée sur les performances de cette variante selon chaque sous-objectifs; le danger provient du fait que les sous-objectifs peuvent être déclarer de manière à respecter la réglementation et donc nous pouvons nous satisfaire d'une valeur moyenne dans certains cas : l'utilisation de cette opération est très répandue dans les domaines faisant appels à l'intelligence artificielle [62-BLOKLEY].

Même si la démarche poursuivie suppose que les critères sont d'égale importance, on remarque que la représentation des objectifs par des sous-ensembles flous permet de moduler le caractère critique de chaque critère : plus un critère est jugé important, plus l'objectif correspondant sera pointu.

Le décideur interviendra aussi lors de la recherche de l'opération de l'agrégation. Cette intervention traduit son attitude relative à l'évaluation des critères : si une solution est mal notée au sens d'un critère, elle bénéficie d'une attitude relativement indulgente; ceci se traduit par l'acceptation du décideur d'une solution moyennement compatible avec l'objectif fixé relatif à ce critère.

3.3- La démarche d'agrégation et le rôle du décideur :

La méthode utilisée (chapitre 2 partie I) est basée sur l'agrégation de N critères par combinaison symétrique des objectifs. L'évaluation globale d'une solution revient à la recherche d'une application h de $[0,1]^N$ dans $[0,1]$ telle que :

$$\text{pour } x \in X \quad \mu(x) = h(\mu_1(x), \mu_2(x), \dots, \mu_N(x))$$

où x représente dans notre cas une solution possible de l'ensemble X de solutions.

et $\mu_1(x)$ est le degré de compatibilité de l'objet x au sens de l'objectif relatif au critère i .

L'hypothèse de la combinaison symétrique, se traduit par une définition récursive de l'opération à N arguments :

$$h^2 = h$$

$$h^N(\mu_1(x), \mu_2(x), \dots, \mu_N(x)) = h(h^{N-1}(\mu_1(x), \dots, \mu_{N-1}(x)), \mu_N(x)).$$

La fonction h dans ce cas doit être symétrique de ces arguments. les fonctions utilisées sont :

- Conjonction (MIN)
- Disjonction (MAX)
- Sommes symétriques associatives
- Médiannes paramétrées.

La qualité globale d'une solution d'un système de fondation peut être décomposée en qualité-technique et qualité économique [62-BLOKLEY]. La qualité technique dépend du comportement de la solution vis à vis de l'objectif élémentaire "portance" et l'objectif élémentaire "tassement".

L'évaluation du sous-objectif technique (portance/tassement) se déroule de la manière suivante :

Nous proposons au décideur trois solutions types déduites de sa définition de l'objectif "portance" et de l'objectif "tassement" de telle manière que :

- La solution S_1 soit incompatible avec l'objectif "portance" mais parfaitement compatible avec l'objectif "tassement".
- La solution S_2 soit moyennement compatible avec les 2 objectifs.
- La solution S_3 soit moyennement compatible avec l'objectif "portance" mais parfaitement compatible avec l'objectif "tassement".

Le jugement du décideur sur chaque solution type sera codé numériquement de la manière suivante :

- | | | |
|---|-------|-----------|
| 1 | ..... | mauvais |
| 2 | ..... | médiocre |
| 3 | ..... | moyen |
| 4 | ..... | bien |
| 5 | ..... | très bien |

Chaque triplet de réponses correspond à une opération standard d'agrégation [41-DUBOIS, PRADE]. Nous présentons ici, quelques opérations utilisées (tab 1):

soit G_1 l'objectif "portance" et G_2 l'objectif "tassement".

$\mu_{G_1}(s)$ = évaluation de l'objet s selon l'objectif G_1

$\mu_{G_2}(s)$ = évaluation de l'objet s selon l'objectif G_2

solution-type :	S1	S2	S3	opération
	-----	-----	-----	-----
	1	1	3	MAX [$\mu_{G_1}(s), \mu_{G_2}(s)$]
	1	2	3	$\mu_{G_1}(s) \cdot \mu_{G_2}(s)$
	1	3	3	MIN [$\mu_{G_1}(s), \mu_{G_2}(s)$]
	1	3	4	$\sqrt{\mu_{G_1}(s) \cdot \mu_{G_2}(s)}$
				$2 \cdot \mu_{G_1}(s) \cdot \mu_{G_2}(s) / (\mu_{G_1}(s) + \mu_{G_2}(s))$
	2	3	3	med [$\mu_{G_1}(s), \mu_{G_2}(s), 1/4$]
	3	3	4	$(\mu_{G_1}(s) + \mu_{G_2}(s)) / 2$

tab. 1- Exemples d'opérations d'agrégation.

L'évaluation des solutions selon l'objectif "sécurité" est alors possible, et un premier classement de l'ensemble de solutions possibles est alors réalisé.

La démarche se poursuit de la même manière pour inclure l'objectif économique dans la procédure d'agrégation.

S'il s'avère impossible de classer les solutions selon l'objectif global : par exemple si plusieurs solutions semblent répondre à l'objectif fixé avec le même degré d'appartenance; dans ce cas, on requestionne le décideur à partir d'un ensemble de solutions plus restreint pour sélectionner une opération d'agrégation plus adéquate.

3.5- Discussion et conclusion :

La pondération des critères est probablement la méthode la plus répandue pour l'agrégation des critères. Sa principale justification réside dans le fait que l'on peut parcourir tout l'ensemble des éléments maximaux d'un ensemble d'objets au sens de q critères en faisant varier la pondération et en optimisant

pour chaque pondération la valeur de chaque critère. L'une des raisons qui nous a poussé à ne pas utiliser cette méthode et que l'évaluation des poids est problématique, mais aussi le fait que les valeurs prises par les critères renvoient à des grandeurs qui n'ont rien en commun.

L'utilisation de seuils de satisfaction s'interprète par l'existence, pour chaque critère, d'un seuil minimum S qu'il faut atteindre pour considérer comme acceptable l'évaluation d'un objet au sens de ce même critère. Il est clair que cette approche est un cas particulier de celle qui a été adoptée, puisque la connaissance du seuil S_i revient à la donnée d'un objectif flou G_i (fig 27) tel que :

$$\mu_{G_i}(m_i(x)) = 1 \quad \text{si } m_i(x) > S \quad \text{où } m_i(x) \text{ est la valeur de l'évaluation de l'objet } x \text{ au sens du critère } i.$$

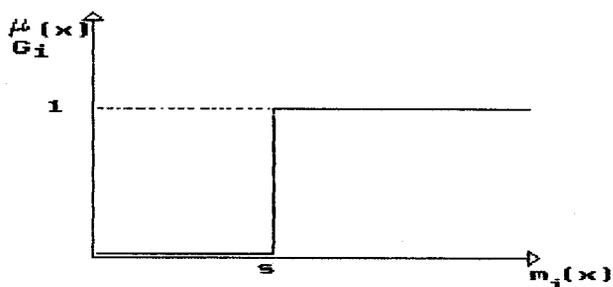
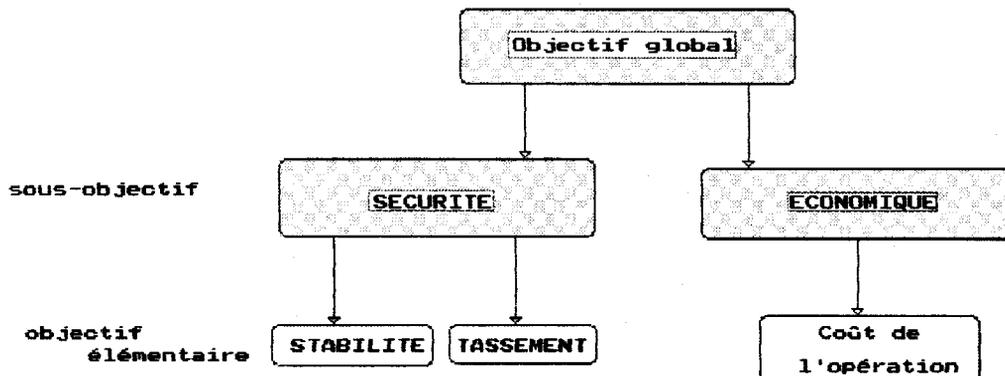


fig 27- Seuil de satisfaction et objectif flou.

L'ensemble de réponses possibles comporte 50 triplets, et le nombre d'opérations d'agrégation actuellement prises en compte est de 18; ces opérations permettent de gérer 12 triplets de réponses. Cet ensemble d'opérations est loin d'être exhaustif mais beaucoup de triplets de réponse (non prises en compte) sont proches de ceux actuellement traités (tab. 1). Remarquons aussi que certaines réponses sont irréalistes, et que quelques attitudes du décideur se ramènent à la même opération d'agrégation.

Cette méthode suppose que l'objectif global (Caractéristiques souhaitées) pour la solution recherchée d'un système de fondation est représentable par une arborescence dont les feuilles sont des objectifs élémentaires; chaque embranchement correspond à une opération d'agrégation; ainsi, pour les critères traités dans le cadre de cette étude, une représentation possible de l'objectif global est la suivante:



Remarquons que cette méthode ne peut être appliquée que pour des problèmes bien spécifique et seulement dans le cas où la nature de l'objectif global permet sa décomposition de la manière précédente; le problème devient plus complexe lorsque le nombre de critère devient important. Notons pour terminer que cette méthode pourrait être très utile dans un système capable de générer des variantes; dans ce cas cette méthode permettrait d'optimiser le problème de choix d'une solution parmi l'ensemble de variantes.

CONCLUSION de la deuxième partie :

La complexité du problème de choix d'un système de fondation nous a amené à considérer des hypothèses spécifiques qui ont réduit le champ d'application des réponses proposées.

Remarquant l'importance de la campagne d'essais géotechniques dans l'étude des fondations, nous avons, sans reprendre fondamentalement ce problème, proposé quelques réponses pratiques. Ce sont essentiellement les conséquences de cette campagne sur la poursuite du projet qui nous ont préoccupé; nous avons ainsi étudié deux paramètres de la qualité d'une campagne d'essais : la profondeur de reconnaissance et la compatibilité des essais avec les couches traversées. L'étude d'autres paramètres tels que le nombre d'essais et leur position par rapport à l'emplacement des éléments de fondation représente un intérêt considérable et fait l'objet d'un autre travail de recherche en cours dans le laboratoire.

En ce qui concerne l'évaluation technique (portance et tassement), nous avons eu pour principe de couvrir la plupart des cas (rencontrés dans la pratique) de nature des sols de fondations. D'autre part l'hypothèse d'une charge centrée est loin d'être justifiée dans la réalité, l'excentrement des charges est souvent provoqué par des constructions voisines et par des considérations liées à la superstructure de l'ouvrage projeté. Il convient donc, d'ajouter les cas des semelles excentrées aux cas traités à l'état actuel.

L'étude économique détaillée n'est réalisée que pour les fondations superficielles; elle est justifiée par le fait que sa réalisation ne nécessite que très peu d'informations supplémentaires. Les fondations profondes sont évaluées à partir des prix unitaires forfaitaires au mètre linéaire du pieu, l'utilisation de ces méthodes n'est valable qu'à une étape préliminaire du processus.

L'utilisation de la théorie des ensembles flous comme cadre conceptuel pour les problèmes de choix multicritère est basée sur une représentation des objectifs et contraintes par des sous-ensembles flous. La méthode qui vient d'être exposée intègre des éléments de préférence flous du décideur. Sa principale difficulté réside en la formulation des objectifs; cette formulation nécessite la définition des fonctions d'appartenance qui sont associées à ces objectifs. Les éléments proposés pour la formulation des objectifs relatifs aux critères étudiés n'indiquent qu'une tendance générale des fonctions d'appartenance. L'étude d'autres éléments pouvant aider à la formulation de ces objectifs représentent un intérêt considérable.

Troisième Partie

Maquette Informatique

et

Exemples d'applications

INTRODUCTION :

Nous avons développé dans la deuxième partie de ce mémoire les différents volets de ce travail de recherche. Nous avons montré que l'aide au choix d'un système de fondation, en phase d'Avant-Projet se décompose en trois étapes : La première étape concerne la reconnaissance de sol, la deuxième est relative à l'évaluation technico-économique, et la troisième concerne le classement des variantes selon les critères prises en compte.

Nous entendons prouver, par ce travail, la possibilité de réaliser l'évaluation technique et l'évaluation économique d'une proposition d'un système de fondation. L'étude rapide de plusieurs variantes, dans un temps compatible avec les exigences de la C.A.O, pour offrir, en ces termes, une aide aux concepteur dans ce domaine. Une analyse des différentes variantes étudiées est alors possible dans un esprit multicritère.

Concernant l'évaluation technique, nos exigences ont été 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. Cet outil doit permettre d'indiquer les éléments de fondation qui sont mal dimensionnés et offrir la possibilité de modifier les paramètres de conception dans le but de les améliorer.

L'autre volet de ce travail de recherche est le développement d'un outil de sélection des solutions possibles basé sur la théorie des sous-ensembles flous. Cet outil doit permettre de simuler le caractère flou des paramètres ayant permis d'évaluer les différentes solutions.

Dans cette partie nous présentons la maquette réalisée et développons ses différents modules.

1- L'environnement de la maquette

1.1- Généralités :

Le matériel informatique :

La maquette a été développée sur un micro-ordinateur (type PS/2); Elle comporte dix mille lignes environ, réparties de la manière suivante :

700 lignes pour l'étude de la reconnaissance du sol,
8000 lignes pour l'évaluation d'un système de fondation,
1300 lignes pour le classement des solutions,

et 17 fichiers à accès direct. Le langage utilisé est le PASCAL (Turbo pascal V. 4.0). Plusieurs procédures graphiques ont été réalisées pour visualiser les différents éléments du projet et simplifier la saisie des données.

Les données :

Les données nécessaires sont de 4 types :

- . Données générales sur le projet.
- . Données relatives aux couches du sol de fondation.
- . - - - - - aux résultats d'essais réalisés.
- . - - - - - concernant les différents éléments constituant le système de fondation.

D'autres données spécifiques à chaque composante de la maquette sont précisées lors de leur présentation détaillée.

1.2- Architecture sommaire

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". Nous présentons ici, d'une manière sommaire, leurs fonctionnalités.

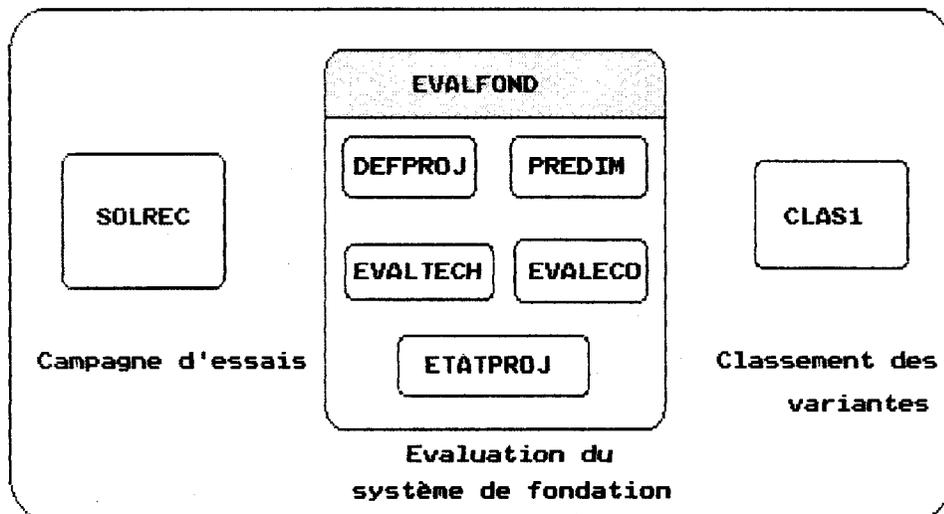


fig 1- Organisation de l'outil informatique.

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. Les données nécessaires à ce module sont des informations générales sur l'ouvrage projeté et d'autres en provenance du rapport géologique (informations sommaires sur la présence des couches en profondeur).

EVALFOND : 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 fondation et les informations générales sur le bâtiment projeté. Il représente le point d'entrée du logiciel "EVALFOND".

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- Etude des modules et exemples d'applications

Dans ce paragraphe , nous présentons en détail les différentes composantes de la maquette, ainsi que des exemples d'utilisation de chacune de ces composantes.

2.1- Le module relatif à la campagne d'essais

Ce module baptisé "SOLREC" a été développé indépendamment du logiciel d'évaluation des fondations et divisé en 2 parties (fig 2) :

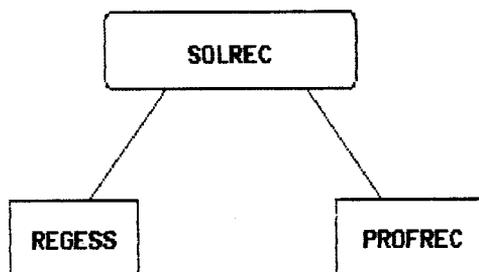


fig 2-

Le sous-module "REGESS" comporte les règles de compatibilité ou d'incompatibilité entre la nature de la couche du sol et les différents essais pris en compte. Le sous-module "PROFREC" concerne la recherche de la profondeur minimale de reconnaissance. L'organisation de ce module est présentée par la figure 3.

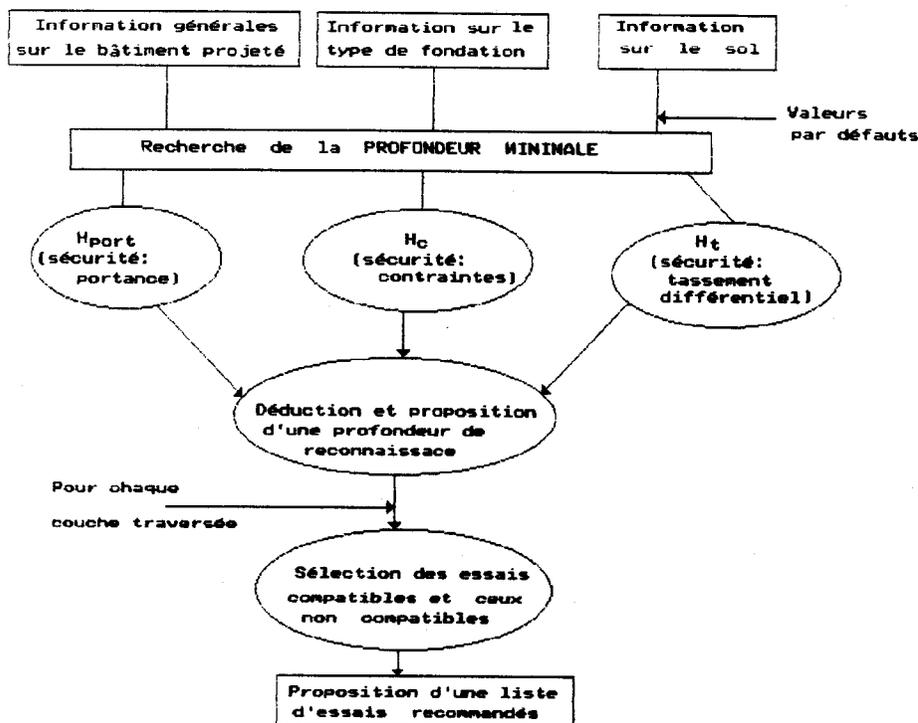


fig 3- Architecture du module "SOLREC" (SOL-RECONNAISSANCE)

Prenons l'exemple d'un bâtiment dont la superstructure repose sur des poteaux formant une maille de 10 mètres. L'utilisateur doit répondre à un questionnaire relatif au sol superficiel du terrain et au type de fondation et du bâtiment projeté. Nous introduisons les caractéristiques du sol superficiel (fig 4):

fig 4- Informations sur le sol superficiel.

```

OBJECTIF : Profondeur de reconnaissance
*****

Informations sur les couches
-----

1 ..... Rocher dur
2 ..... Roches tendres ou altérées
3 ..... Argille molle
4 ..... Argille moy. consistante
5 ..... Argille très consistante
6 ..... Sable argileux
7 ..... Sables et graviers
8 ..... Limons et sols intermédiaires
9 ..... Vases et tourbes
10 ..... Sol très hétérogène

nature de la 1 couche          : 6
profondeur couche (comptes à partir
du niveau du terrain naturel) en m : 2

donnez la profondeur de la nappe
tapes 0 si inconnue          : 0
    
```

Des valeurs par défaut des caractéristiques mécaniques sont prévues en fonction de la nature du sol superficiel observé (annexe 2). Il est évident qu'une connaissance exacte de ces valeurs n'est pas possible à ce niveau et que l'observation peut indiquer si la nature du sol (plutôt compressible, compact...). Nous préférons introduire ces caractéristiques en notre possession :

Données sur le sol	

Voulez-vous introduire les caractéristiques mécaniques de la couche superficielle (o/n) : o	
donnez le poids spécifique humide du sol (Kn/m ³) : 20	
la cohésion (Kpa)	: 35
l'angle de frottement interne (degré)	: 25
le module d'élasticité du sol du sol (Kpa)	: 8000

Concernant les dimensions des fondations, des valeurs approximatives sont suffisantes; nous décidons d'essayer des semelles isolées carrées (1.3 x 1.3 mètres) :

données générales sur le bâtiment	

donnez la pression moyenne sur les fondations (Kpa) : 7.5	
longueur du bâtiment (m)	: 45
largeur -	: 18

données sur la fondation	

largeur de la fondation	: 1.3
longueur -	: 1.3
espacement des semelles ou largeur du radier	: 10
donnez la contrainte moyenne appliquée sur les semelles (Kpa)	: 250
la profondeur envisagée (m)	: 1.5

fig 5- Informations sur le bâtiment et la fondation.

Le traitement est réalisé pour l'ensemble (solution par radier général) ainsi que pour les semelles (solution par semelles isolées). Les profondeurs de reconnaissance sont calculées en tenant compte de 3 critères :

- 1- Critère de stabilité.
- 2- Critère en contraintes (tassement absolu).
- 3- Critère en tassement (tassement différentiel).

Traitement des semelles

Profondeur de reconnaissance recommandée

Critère de STABILITE : la profondeur mini = 6.5 metres

Critère en CONTRAINTES : la profondeur mini = 3.4 metres
(tassement absolu)

Critère en TASSEMENT :

Selon le degré de TOLERANCE
sur le TASSEMENT admissible : la profondeur doit être comprise
entre 3.3 et 4.7 metres

Il convient de retenir une profondeur
de l'ordre de : 7 mètres

fig 6- Proposition d'une profondeur de reconnaissance.

La recommandation d'une liste d'essais est réalisée en tenant compte de la profondeur de reconnaissance, et la nature des différentes couches traversées :

Objectif : campagne d'essais

Les essais impossibles à réaliser
ou inutile :

Scissomètre.

Les essais possibles à réaliser demandant
des précautions (interprétations, exécution) :

Pénétromètre Statique.
Triaxial.
Compression simple.
Oedomètre.

Les essais recommandés sont :

Pressiomètre.
Pénétromètre Statique-Dynamique
Boite de CASAGRANDE.

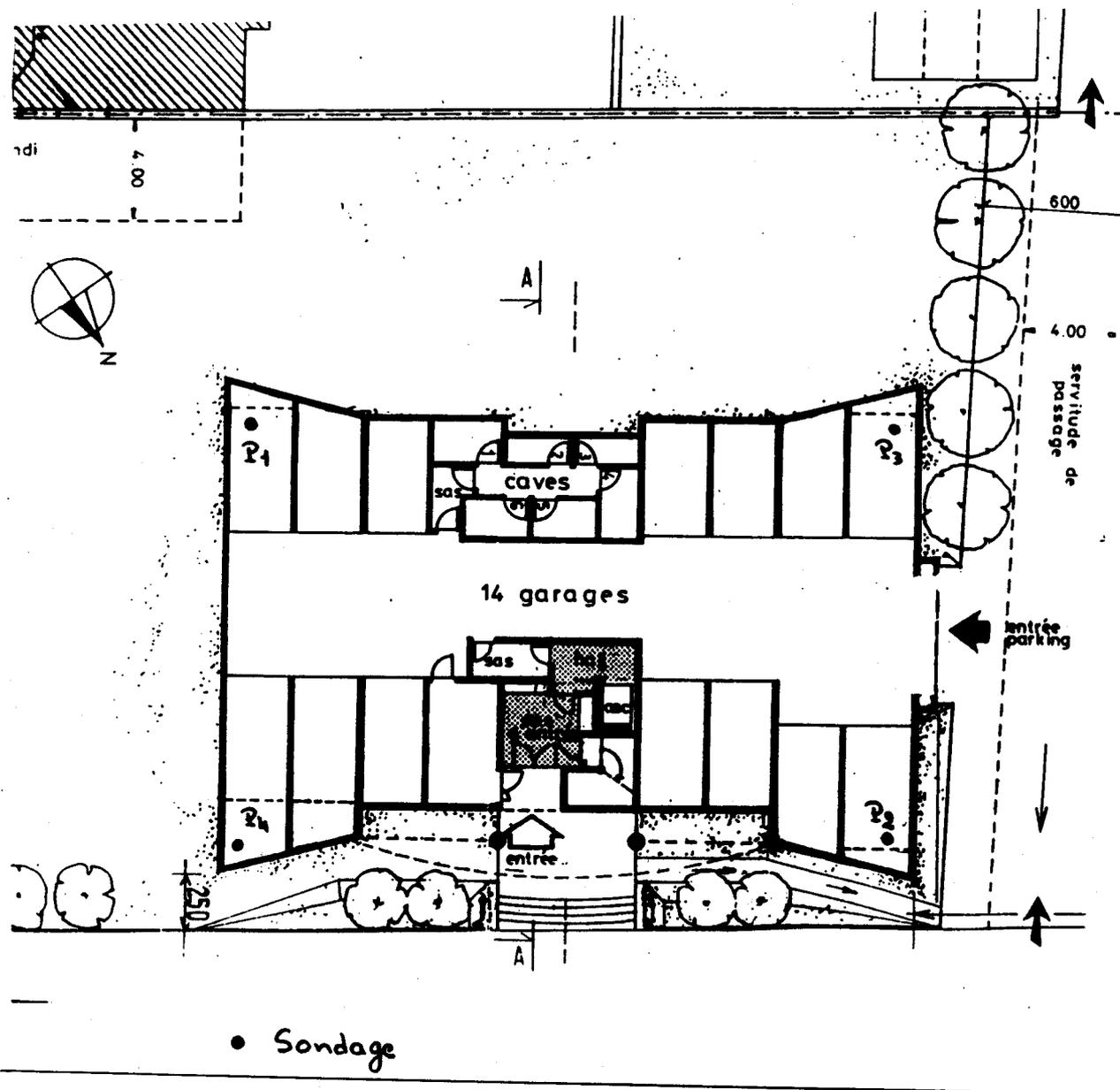
fig 7- Proposition d'une liste d'essais compatibles avec les couches traversées.

Remarque :

Le résultat que l'on peut tirer de ce calcul est de nature indicatif; il dépend de la qualité des informations introduites sur le sol superficiel, la pression appliquée sur les fondations. La profondeur proposée renseigne sur la nature de la reconnaissance qu'il conviendra d'envisager (profonde, très profonde...).

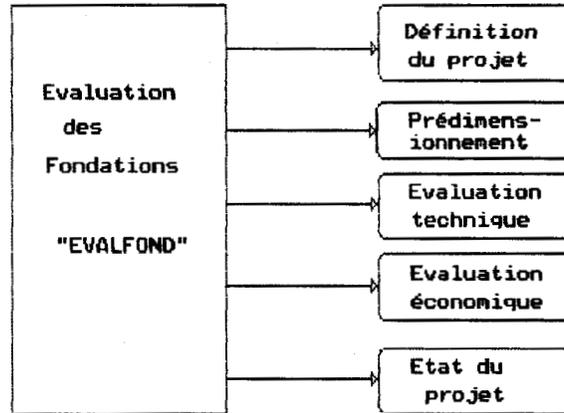
2.2- Le Logiciel d'évaluation des fondations :

Nous exposons dans ce paragraphe l'organisation des différents modules du logiciel "EVALFOND". Un exemple d'application est détaillé au fur et à mesure de l'avancement de la description de ce logiciel. L'étude est relative à un projet de construction d'un immeuble à usage d'habitation. L'immeuble projeté comprendra 4 niveaux de logements sur sous-sol semi-enterré (environ 1.2 mètres) à usage de parking et de caves. Son emprise au sol est de l'ordre de 28m x 21m .



Plan de masse du projet.

Les différentes actions possibles lors de l'activation du logiciel sont:



Il est difficile de montrer toutes les possibilités de ce logiciel à partir de l'exemple traité; nous précisons ci-dessous le cheminement des actions et les points de base de traitement adoptés :

- Définition du projet : nous introduisons dans un premier temps les données générales sur l'ouvrage projeté; les couches du sol de fondation ainsi que les essais réalisés sont introduits ensuite.

- La saisie des éléments du système de fondation est réalisée après prédimensionnement.

- L'évaluation de la portance est réalisée à partir de l'essai pénétrométrique générée; la génération de cette courbe est effectuée lors de l'introduction des essais réalisés par le module de définition du projet ("DEFPROJ"). Le tassement est réalisé à partir d'un essai oedométrique réalisé dans la couche d'assise.

- L'évaluation économique est présentée pour une partie du projet. Le calcul détaillé des armatures est réalisé selon les règles du B.A.E.L., et nous supposons que les semelles sont coffrées.

- Concernant l'action "ETAT DU PROJET", nous présentons seulement les informations relatives à l'état des évaluations techniques des différents éléments du projet. Cette action permet d'avoir d'autres informations sur le projet en cours de traitement (type du projet, état des évaluations économiques...).

2.2.1- La définition du projet :

Le projet de fondation comporte des données de diverses nature :

Le sol : . les couches du sol en profondeur.
 . Les résultats d'essais réalisés.

Les éléments de fondation : une description de ces éléments ainsi que les éléments porteurs de la superstructure qui leur sont associés.

Informations générales sur l'ouvrage projeté: les dimensions de la construction et l'espacement moyen entre poteaux ou murs ainsi que le nom du projet.

Selon les modélisations retenues, la description de ce module peut être la suivante (fig 8) :

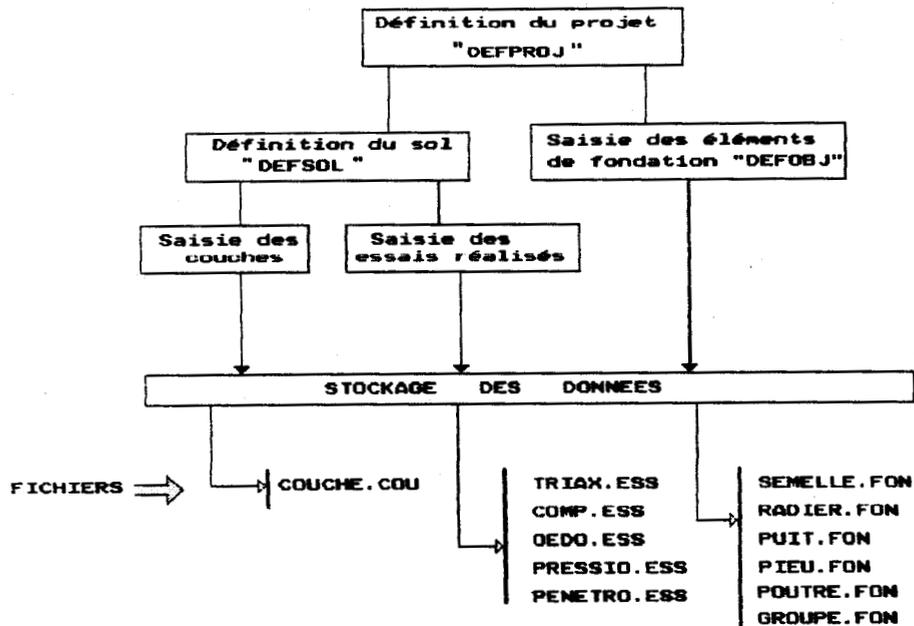


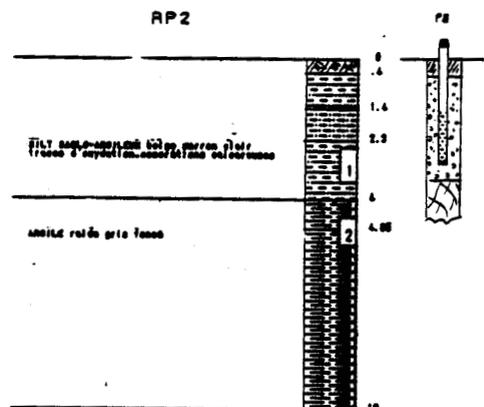
fig 8- Définition d'un projet de fondation.

Le rapport géologique concernant l'étude de la construction (R+4) a révélé l'existence en profondeur de 3 couches :

- . LIMON : 0-4 mètres.
- . ARGILE moyennement compacte : 4-16 mètres.
- . SABLE et GRAVIER au delà.

La profondeur de la nappe est de 2.60 mètres.

fig 9- Coupes du terrain.
 (d'après le rapport géologique)



Ces trois couches sont alors introduites par ce module :

Vous avez 3 occurrences
d'objet "couche"

H	nappe	pendage	nature	poids spec	numéro
4.00	2.60	0.000	1	20.50	1
12.00	0.00	0.000	2	19.50	2
10.00	0.00	0.000	4	19.00	3

- 1 ajouter des éléments
- 2 modifier
- 3 supprimer
- 4 fin

VOTRE CHOIX : 4

fig 10- Introduction des données relatives
aux différentes couches en profondeur.

Pour ce projet, 4 essais pénétrométriques ont été réalisés et 2 essais oedométriques. Les courbes correspondantes à ces essais sont alors introduites .

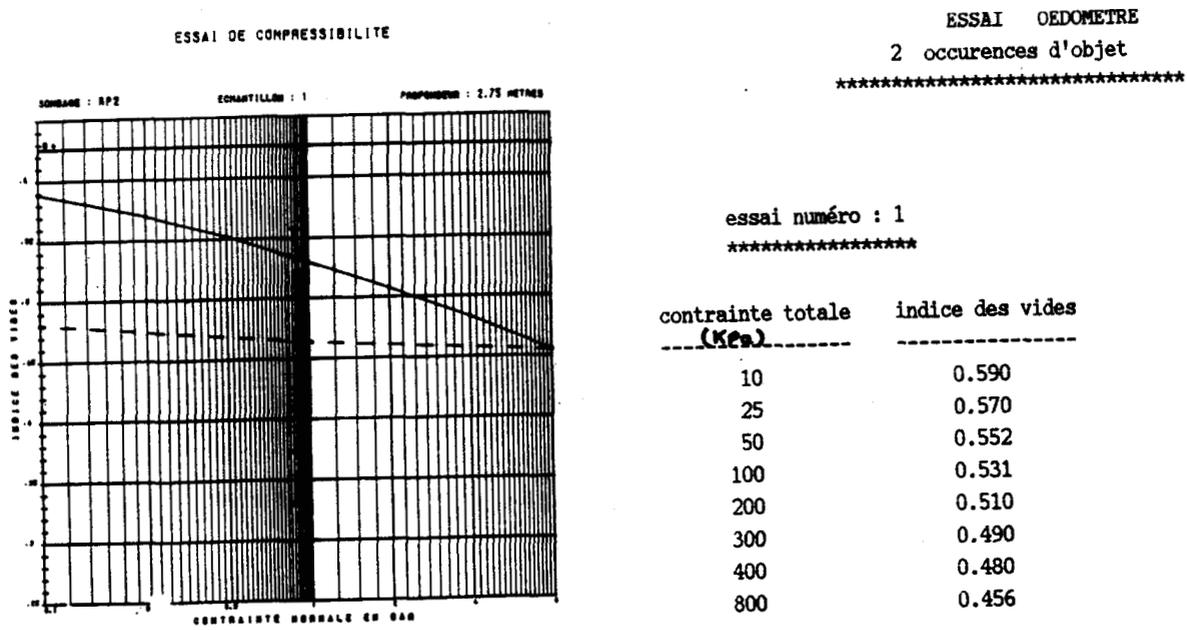


fig 11- Saisie d'une courbe oedométrique.

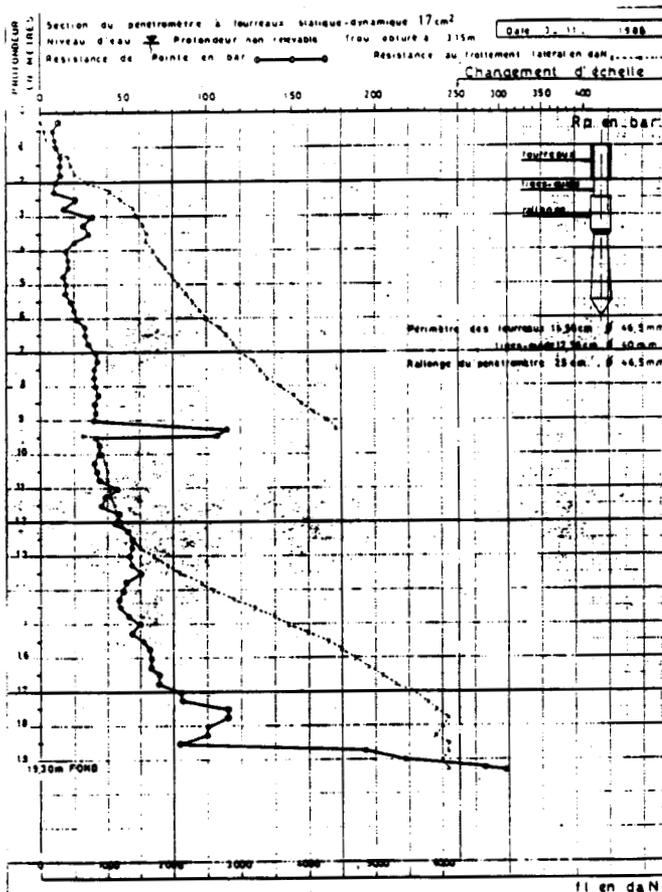
La saisie de l'essai pénétrométrique est activée, les 4 courbes courbes d'essais sont alors introduites. Nous présentons ici la saisie correspondante correspondante à l'essai numéro 1 (sondage P1).

essai numero : 1

profondeur (mètres)	resistance de pointe (Kpa)
0.50	1000.0
1.00	1100.0
1.50	1500.0
2.00	1000.0
2.50	2000.0
3.00	2000.0
3.50	2500.0
4.00	1700.0
4.50	1700.0
5.00	1700.0
5.50	2000.0
6.00	2100.0
6.50	2500.0
7.00	3000.0
7.50	3200.0
8.00	3200.0
8.50	3000.0

profondeur (mètres)	resistance de pointe (Kpa)
9.00	3000.0
9.50	3200.0
10.00	3400.0
10.50	3400.0
11.00	4000.0
11.50	3800.0
12.00	4100.0
12.50	5000.0
13.00	5200.0
13.50	5600.0
14.00	5000.0
14.50	5000.0
15.00	6000.0
15.50	6000.0
16.00	6800.0
16.50	7200.0
17.00	8100.0
17.50	11000.0

profondeur (mètres)	resistance de pointe (Kpa)
18.00	10000.0
18.50	10000.0
19.00	22500.0



Nous décidons de générer une nouvelle courbe (fig 12) à partir des 4 courbes déjà introduites. Nous utilisons cette nouvelle courbe (fig 13) pour évaluer la portance des fondations.

Vous avez 4 occurrences d'objet 'Pénétrmètre'

fig 12- Génération d'une nouvelle courbe.

- 1 ajouter des éléments
- 2 modifier
- 3 supprimer
- 4 générer une courbe à partir de plusieurs essais.
- 5 fin

VOTRE CHOIX : 4
 donnez le nb d'essais pour la génération : 4
 donnez un numero à la courbe générée : 5

numéros des essais pour la génération :
 : 1
 : 2
 : 3
 : 4

essai numero : 5

profondeur (mètres)	resistance de pointe (Kpa)
0.50	900.0
1.00	1400.0
1.50	1600.0
2.00	1400.0
2.50	1400.0
3.00	1300.0
3.50	1100.0
4.00	1200.0
4.50	1400.0
5.00	1500.0
5.50	1800.0
6.00	2300.0
6.50	2600.0
7.00	3100.0
7.50	4000.0
8.00	3600.0
8.50	3100.0

La génération de cette courbe à partir des courbes d'essais réalisés est justifiée par la dispersion des sondages (plan de masse, page 103). Plusieurs combinaisons possibles des courbes d'essais réalisés peuvent être envisagées pour les évaluations techniques des différents éléments du projet.

Dans l'exemple traité, cette courbe sera utilisée pour l'évaluation de la portance de tous les éléments de fondation du projet en cours.

profondeur (mètres)	resistance de pointe (Kpa)
9.00	3300.0
9.50	3600.0
10.00	3200.0
10.50	3300.0
11.00	3700.0
11.50	3900.0
12.00	4400.0
12.50	4800.0
13.00	5000.0
13.50	5100.0
14.00	5100.0
14.50	5300.0
15.00	5800.0
15.50	6300.0
16.00	7300.0
16.50	7700.0
17.00	8200.0
17.50	8800.0

profondeur (mètres)	resistance de pointe (Kpa)
18.00	11200.0
18.50	18300.0
19.00	24900.0

fig 13- résistance de pointe
(courbe générée).

Deux possibilités sont prévues pour la création des éléments de fondation :

Scénario 1 : L'utilisateur souhaite l'évaluation des éléments dont il peut estimer les dimensions : dans ce cas, les différents éléments seront créés à ce niveau.

Scénario 2 : Dans l'autre cas, la création des éléments de fondation est réalisée, à partir du module "PREDIM", après prédimensionnement.

Pour le projet en cours, nous utilisons le deuxième scénario pour créer les éléments du système de fondation.

L'analyse de la descente de charges induit 8 'semelles types' (selon les valeurs de la charge de service apportée aux fondations). Le tableau suivant représente les données de la superstructure nécessaires à l'activation des différentes évaluations possibles :

Semelles filantes pour R+4

semelle	type	L m	G KN/ml	Q KN/ml	Fser KN/ml	Fult KN/ml
1	1	5.70	50	12	62	86
4		5.70				
5	2	2.20	40	15	55	76
7		5.50				
9		5.60				
11	3	2.50	55	13	68	95
13		5.60				
2	4	7.50	120	30	150	200
8	5	16.5	150	30	180	250
14		7.50				
15		2.20				
6	6	4.50	150	60	210	290
10		6.50				
3	7	4.50	240	60	300	415
12	8	6.50	290	45	335	460

Radiers partiels pour R+4

Radier	L m	B m	Fser KN/m2	Fult KN/m2
1	9.50	5.50	52	73
2	9.50	7.50	60	85

L'utilisation de ce module permet de créer les éléments de fondation constituant le projet (fig 15-b) : le prédimensionnement est réalisé (fig 15-a) à partir d'une contrainte admissible approximative du sol de 140 Kpa déduite de la courbe pénétrométrique (valeur de Rp/10 à la profondeur 2.60 mètres) :

```

Prédimensionnement SEMELLE
*****

1 ..... Semelle isolée rectangulaire
2 ..... - filante
3 ..... - sur pieu
4 ..... - sur puit
5 ..... retour menu principal

votre choix : 2
:
DIM SEMELLE FILANTE
*****

1 ..... Longueur      = 5.700 m
2 ..... Largeur       = 0.600 m
3 ..... Profondeur    = 1.800
4 ..... Epaisseur     = 0.250
5 ..... Hauteur en rive = 0.200

voulez-vous modifier ces dimensions (o/n): n
  
```

```

création d'un objet semelle
-----

numero de la semelle      : 1

longueur en mètres       : 5.70
largeur -                 : 0.60
profondeur -             : 1.80
épaisseur -              : 0.25
hauteur en rive -       : 0.20
grand coté poteau ou mur en cm : 530.0

petit coté - - - cm : 20.0
la charge E.L.S Kn      : —
- Kn/ml                 : 62.00
Contrainte admissible en Kpa : 140.00
Tassement en cm       : 0
poids d'acier en Kg   : 0
volume du béton m3    : 0
surface de coffrage en m2 : 0
type de la semelle     : filante

la charge E.L.U : —
la charge E.L.U :86.00
  
```

a- Réalisation du prédimensionnement

b- création des éléments

-fig 15-

Le prédimensionnement est réalisé pour les différents éléments, les dimensions proposées peuvent être remises en cause après évaluation. Le projet en cours contient à l'état actuel (fig 16) :

Le projet en cours
 contient 15 occurrences d'objet SEMELLE

L (m)	B (m)	D (m)	F(KN) KN/ml	QAD (Kpa)	Wm (cm)	Acier (Kg)	V.béton (m3)	coff. (m2)	NUM	SEMELLE
5.70	0.60	1.80	62.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	1	filante
7.50	1.20	1.80	150.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	2	filante
4.50	2.20	1.80	300.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	3	filante
5.60	0.60	1.80	62.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	4	filante
2.20	0.60	1.80	55.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	5	filante
4.50	1.60	1.80	210.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	6	filante
5.50	0.60	1.80	55.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	7	filante
16.50	1.40	1.80	180.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	8	filante
5.60	0.60	1.80	55.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	9	filante
6.50	1.60	1.80	210.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	10	filante
2.50	0.60	1.80	68.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	11	filante
6.50	2.50	1.80	335.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	12	filante
5.60	0.60	1.80	68.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	13	filante
7.50	1.40	1.80	180.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	14	filante
2.20	1.40	1.80	180.0	140.00	0.00	0.00	0.000	0.000	15	filante

Le PROJET en cours
 contient 2 occurrences d'objet RADIER

L (m)	B (m)	D (m)	F(KN) KN/m2	Qad (Kpa)	Wm (cm)	Acier (Kg)	V.béton (m3)	coffra. (m2)	NUM	RADIER
9.50	5.50	1.80	52.0	140.00	0.00	0.0	0.000	0.000	1	épais
9.50	7.50	1.80	60.0	140.00	0.00	0.0	0.000	0.000	2	épais

fig 16- L'état du projet en cours

L'évaluation de la portance n'est pas obligatoire (si elle a été faite à l'extérieure de la maquette, ou si à ce niveau d'étude, l'utilisateur estime pouvoir s'en passer). Dans ce cas la valeur de la portance sera la même que celle introduite directement par l'utilisateur lors de la création de l'élément de fondation (création par le module de prédimensionnement ou lors de la définition du projet).

Les 2 scénarios possibles sont donc :

Scénario 1 : L'utilisateur ne caractérise le sol que par une portance forfaitaire unique sous chaque élément de fondation, ou sous une partie du système de fondation.

Scénario 2 : L'utilisateur souhaite utiliser les résultats de la campagne d'essais. Il doit utiliser la modélisation du sol de fondation en assimilant un ou plusieurs essais aux couches en profondeur sous la (ou les) fondation (s). Ce scénario sera utilisé pour le projet en cours.

Pour l'évaluation de la portance nous désignons l'identificateur de la courbe pénétrométrique générée (n = 5) ainsi que les différentes couches sous la fondation. Le résultat est présenté sous forme d'un rapport de la portance sur la valeur de la contrainte appliquée sur la fondation. Dans le cas où ce rapport est inférieur à 3, coefficient de sécurité généralement admis, nous proposons une modification de certains paramètres susceptibles de l'améliorer (c'est le cas de plusieurs semelles du projet).

Pour la semelle numéro 1, nous indiquons qu'il s'agit d'une action ponctuelle (non globale) et le type de l'évaluation :

```

EVALUATION TECHNIQUE
*****
                GLOBALE réalise l'évaluation de tous
                les éléments "type" du projet en cours

1 ..... Semelle          11 ..... globale
2 ..... puit              12 ..... -
3 ..... pieu              13 ..... -
4 ..... radier            14 ..... -
5 ..... Bilan technique
6 ..... retour menu principal

votre choix : 1

                Evaluation des éléments de fondation
                *****

1 ..... Evaluation de la Portance
2 ..... - du Tassement
3 ..... Retour menu précédent

votre choix : 1
    
```

Le cheminement de cette action se poursuit de la manière suivante:

```

Evaluation portance - SEMELLE
*****

Evaluation à partir d'un essai ----->
1 ..... triaxial ou boite
2 ..... compression simple
3 ..... pressiometre
4 ..... penetrometre statique

votre choix : 4

donnez le numero de l'objet semelle : 1

ESSAI : PENETROMETRE statique
Objet : SEMELLE
*****

donnez le nb de couches sous la semelle: 3
le numero de la couche supérieure : 1
le numéro de la 2 couche : 2
le numéro de la 3 couche : 3

- de l'essai pénétrométrique : 5
  
```

Le résultat de cette action est présenté par la figure 18-a, la semelle présente un rapport de la portance sur la pression appliquée inférieur à 3, nous engageons une modification de la largeur de la semelle :

```

----- MODIFICATION -----
*****

D ----- MODIF DIMENSIONS
P ----- - PROFONDEUR SEMELLE
M ----- - INTERNE
C ----- continuer

B = 0.6 m
L = 5.7
D = 1.8
COWT ADMISSIBLE = 100.00 Kpa
COWT APPLIQUEE = 103.33 Kpa

VOTRE CHOIX : d
  
```

```

RESULTAT TRAITEMENT
*****

La SEMELLE filante numero : 1
Evaluation : PORTANCE

PROFONDEUR = 1.80 m
LARGEUR = 0.60 m
LONGUEUR = 5.70 m

COWT ADMISSIBLE = 100.00 Kpa qd/qsp = 2.90 Kpa
PRESSION APPLIQUEE = 103.33 Kpa la charge = 62.0 Kk/ml

MODIFICATION (0/N) : 0
  
```

```

RESULTAT TRAITEMENT
*****

La SEMELLE filante numero : 1
Evaluation : PORTANCE

PROFONDEUR = 1.80 m
LARGEUR = 0.80 m
LONGUEUR = 5.70 m

COWT ADMISSIBLE = 108.33 Kpa qd/qsp = 4.19 Kpa
PRESSION APPLIQUEE = 77.50 Kpa la charge = 62.0 Kk/ml

MODIFICATION (0/N) : N
  
```

a- résultat du traitement

b- modification

fig 18- Evaluation de la portance

Concernant les fondations profondes, la démarche est la même mais le mode d'exécution intervient dans l'évaluation : supposons que nous souhaitons essayer une solution par pieux, pour le projet actuel, le sol de fondation étant toujours identique.

```

Evaluation portance - Pieu
*****

Evaluation à partir          1 ..... classique
d'un essai ----->       2 ..... pressiomètre
                          3 ..... penetrometre statique

votre choix : 3

donnez le numero de l'objet PIEU : 2

Essai : PENETROMETRE statique
Objet : PIEU
*****

donnez le nb de couches      : 3
le numero de la couche supérieure : 1
le numéro de la 2 couche      : 2
le numéro de la 3 couche      : 3

- de l'essai pénétrométrique : 5
  
```

Une modification du type de pieux utilisé permet de dresser le tableau récapitulatif suivant (Tab. 1) :

Traitement des PIEUX

La méthode utilisée est due à
BUSTAMENTE et GIANESELLI (D.T.U 13.2)

	FORES					VISSÉS-MOULES				
diametre (cm)	40	40	50	50	60	40	40	50	60	60
Fiche/TN (m)	14	15	15	18	17	12	14	15.5	14	17
capacité (Kpa)	4089	4470	3750	4900	3625	3515	4385	4212	3280	3955
NOMINALE (Kn)	514	562	736	962	1030	442	538	827	900	1118

Tab. 1- Tableau récapitulatif
- solution par pieux -

En ce qui concerne le tassement des fondations, nous utilisons les résultats des essais oedométriques (fig 19-a). Ce module indique l'évolution des contraintes en profondeur et le tassement des différentes tranches sous la fondation (fig 19-b) :

```

Evaluation des éléments de fondation
*****

1 ..... Evaluation de la Portance
2 ..... - du Tassement
3 ..... Retour menu principal

votre choix : 2

VERIFICATION TASSEMENT - Semelle -
*****

1 ---- MODULE DE REACTION DU SOL (E et NU)
2 ---- REGLE PRESSIOMETRIQUE -
3 ---- OEDOMETRE _ méthode integration par tranches
4 ---- continuer

VOTRE CHOIX : 3

numero de la semelle : 1
    
```

Contrainte en profondeur/semelle filante numero : 1
de largeur : 0.80 mètres

D (m)	sigma (kpa)	surcharge (kpa)	amorti -	tass (cm)	rigide (cm)	z/b
1.80	36.9	52.9	1.000	0.33	0.27	0.00
2.00	41.0	50.8	0.959	0.64	0.51	0.25
2.20	45.1	43.3	0.818	0.90	0.72	0.50
2.40	49.2	35.3	0.668	1.09	0.87	0.75
2.60	53.3	29.0	0.549	1.25	1.00	1.00
2.80	55.4	24.3	0.459	1.38	1.10	1.25
3.00	57.5	20.7	0.392	1.49	1.19	1.50
3.20	59.6	18.0	0.340	1.59	1.27	1.75
3.40	61.7	15.8	0.298	1.67	1.34	2.00
3.60	63.8	14.0	0.264	1.75	1.40	2.25
3.80	65.9	12.5	0.236	1.82	1.45	2.50
4.00	68.0	11.2	0.213	1.88	1.50	2.75
4.20	70.1	10.2	0.192	1.94	1.55	3.00
4.40	72.2	9.2	0.175	1.99	1.59	3.25
4.60	74.3	8.4	0.159	2.03	1.63	3.50
4.80	76.4	7.7	0.146	2.07	1.66	3.75

tassement estimé : 1.66 cm

```

ESSAI : OEDOMETRE - semelle -
*****

donnez le nb de couches sous la semelle: 2
le numero de la couche supérieure : 1
le numéro de la 2 couche : 2

numero de l'essai oedométrique : 1
donnez la profondeur d'excavation : 1.2
    
```

```

RESULTAT TRAITEMENT
*****

La SEMELLE filante numero : 1
Evaluation : tassement absolu

PROFONDEUR = 1.80 m
LARGEUR = 0.80 m
LONGUEUR = 5.70 m

TASSEMENT prévisible = 1.66 cm <----- rigide
PRESSION APPLIQUEE = 77.50 Kpa la charge : 62.0 Kn/ml

MODIFICATION (O/N) :
    
```

-a-

-b-

fig 19- Utilisation de l'essai oedométrique pour le calcul de tassement.

L'option "état" du menu principal permet de visualiser l'état du projet en cours (fig 20). L'utilisation de cette option peut se faire à n'importe quel moment du traitement de l'ensemble, nous présentons ici un récapitulatif sur l'état des évaluations techniques :

menu principal

- 1 Définition projet
- 2 Vérification des éléments de fondation
- 3 Réalisation prédimensionnement
- 4 Evaluation Economique
- 5 Visualiser l'ETAT d'un projet
- 6 Fin

votre choix : 5

Etat du projet en cours

le projet actuel contient : 15 semelles

semelle	numero	Fport	Ftass
filante	1	4.2	3.0
filante	2	3.4	1.4
filante	3	4.5	0.9
filante	4	4.2	non-évalué
filante	5	3.3	3.3
filante	6	3.4	1.1
filante	7	3.3	3.3
filante	8	3.4	1.2
filante	9	3.3	3.3
filante	10	3.4	1.1
filante	11	3.8	2.9
filante	12	4.0	0.8
filante	13	3.8	2.9
filante	14	3.4	non-évalué
filante	15	3.4	non-évalué

Etat du projet en cours

le projet actuel contient : 2 radiers

Radier	numero	Fport	Ftass
épais	1	8.1	non-évalué
épais	2	7.0	non-évalué

fig 20- Etat du projet en cours

Nous poursuivons de la même manière l'évaluation du tassement pour les autres éléments du projet. L'évaluation technique de plusieurs éléments du projet étant réalisée, l'option "bilan technique" du module "EVALTECH" indique les valeurs des critères (portance et tassement) pour chaque élément du projet, ainsi que l'essai qui a été choisit pour chaque évaluation :

fig 21- Extrait du Bilan technique.

- semelle filante numero 11 :			
. Portance	= 325.0 Kpa	essai : Pénétro 5	
.. Fpor =	-----	=3.8 <---	ouvrage correct vis à vis de ce critère q.appliquée
. Tassement absolu =	1.7 cm	essai : Oedo 1	
.. Ftass =	-----	=2.9 <---	ouvrage correct vis à vis de ce critère tass. calculé
- semelle filante numero 12 :			
. Portance	= 537.5 Kpa	essai : Pénétro 5	
.. Fpor =	-----	=4.0 <---	ouvrage correct vis à vis de ce critère q.appliquée
. Tassement absolu =	6.1 cm	essai : Oedo 1	
.. Ftass =	-----	=0.8 <---	tassement excessif/à redimensionner tass. calculé

Les éléments de fondation où l'un des critères semble critique sont alors repérés, 3 modifications sont alors possibles :

- Augmenter la section de la base de la fondation.
- - la profondeur d'ancrage si les caractéristiques du sol s'améliorent en profondeur.
- Modification de la description du sol (information nouvelle) par un retour sur la saisie du sol

Pour les semelles où le critère en tassement n'est pas vérifié, nous décidons d'augmenter la largeur par l'option "interne", la largeur minimale nécessaire pour que le tassement soit admissible (sur la base d'un tassement admissible de l'ordre de 5 cm) est alors proposée, l'évaluation de la portance est engagée.

2.2.4- Module d'évaluation économique :

Cette évaluation est possible élément par élément mais aussi globalement, d'une partie où de l'ensemble du projet. Le résultat est présenté sous forme d'un quantitatif et/ou d'un estimatif après proposition de prix unitaires (modifiables).

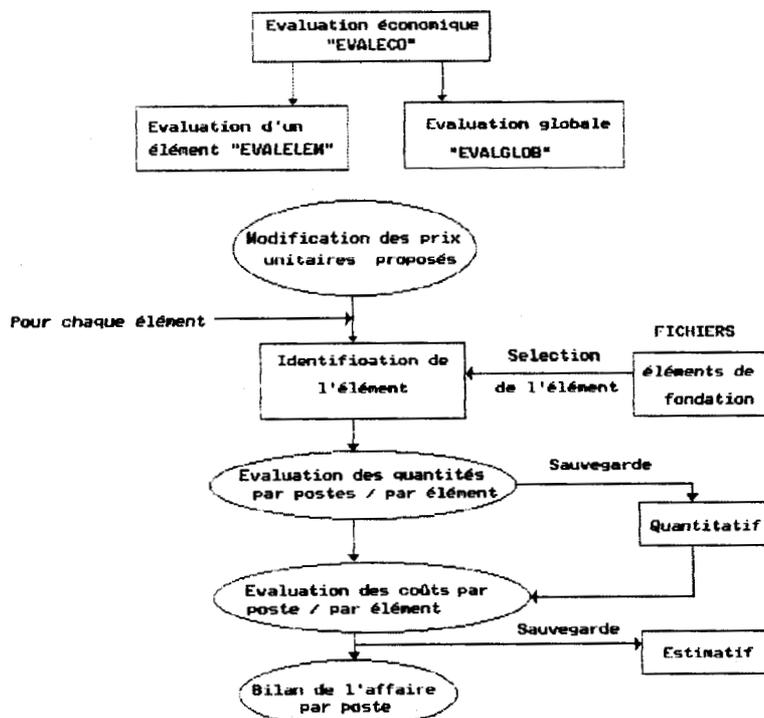


fig 22- Organisation du module d'évaluation économique.

Le quantitatif est réalisé par poste pour les éléments désignés ou globalement (fig 23). Nous présentons l'exemple d'une évaluation détaillée, d'une partie du projet en cours composée de 4 semelles (11,12,13,14)

fig 23- Les scénarios de l'évaluation économique.

Evaluation Economique

1 Semelle
2 pieu
3 puit
4 radier

5 globale ou partie du projet
6 bilan et coût
7 retour menu principal

votre choix : 5

voulez vous introduire les caractéristiques
beton + acier (o/n) : n

1 par ratios
2 - mètres

votre choix : 2

Nous désignons les éléments 11,12,13,14 pour l'évaluation. Un bilan détaillé par élément est alors proposé (fig 24-a : évaluation détaillée de la semelle 14), ainsi que le quantitatif par poste de cette partie du projet (fig 24-b) :

Evaluation globale de la partie
composée de semelles filantes numéro : 11 12 13 14
acier, coffrage, beton

Ferrailage de la semelle filante numero : 14
Règles BAEL 83

armatures transversales = 3.927 cm²/ml
suivant la longueur = 5 : ϕ 10 tous les 20 cm

Armatures longitudinales = 2.262 cm²
suivant la largeur = 8 : ϕ 6 tous les 20 cm
ancrage des barres transversales : avec crochets
ancrage des barres longitudinales : sans crochet

surface de coffrage : 3.6 m²
volume du béton : 3.094 m³
poids d'acier : 59.44 Kg
béton de propreté : 19.1 m²
fouille : 17.6 m³

Bilan des quantités		
poids d'acier total	:	228.1 Kg
volume de béton	-	11.458 m ³
surface de coffrage	-	11.08 m ²
béton de propreté(5 cm)	:	58.7 m ²
volume total des fouilles	:	56.8 m ³

a- quantitatif de la semelle 14

b- bilan

fig 24- Evaluation globale d'une partie

Pour avoir le bilan et l'estimatif, il faut indiquer les prix unitaires ou accepter les prix proposés (fig 25) :

les prix unitaires proposés

1	.....	P.U coffrage (m2)	=	98 F
2	.....	P.U acier (tonne) H.A	=	10300
		P.U acier T.S	=	7100
3	.....	fouille-rigole (m3)	=	63
		Excavation (m3)	=	96.00
4	.....	béton (m3)	=	650
5	.....	propreté (m2) -5cm-	=	42

Voulez vous modifier ces prix (O/N) : n

fig 25- Exemple de coûts unitaires pour l'évaluation des éléments de fondation superficiels.

Nous désignons la partie précédente pour avoir le bilan détaillé par élément (fig 26-a), et le coût global (fig 26-b) de celle-ci :

Semelle numero : 14

V.béton (m3)	P.acier (Kg)	S.coffrage (m2)	V.fouille (m3)	semelle (type)
3.09	59	3.6	19.0	filante
650.00	10.30	98.00	63.00	P.unitaire(F)
2011	612	353	1198.6	P.total (F)

BILAN DE L'AFFAIRE

fouille : 3943 F
beton : 7448
acier : 2349
coffrage: 1086
propreté: 4396

a- Le coût par élément et par poste.

b- bilan pour la partie désignée.

fig 26- Bilan détaillé.

Nous avons préféré l'utilisation d'une étude par mètre, plus précise et ne demande que très peu de données supplémentaires concernant le choix des matériaux.

Pour conclure, l'étude par ratio est adaptée pour des éléments dont l'évaluation technique n'a pas été réalisée (les dimensions à ce niveau ne sont pas confirmées). Une étude détaillée à ce stade ne représente pas d'intérêt.

La faculté, du module d'évaluation détaillée, à intégrer des coûts unitaires choisis par l'utilisateur, permet à cette étude de jouer un double rôle : celui de la préparation à l'étude de prix (après intégration d'autres postes non prises en compte ici), et celui d'aide à la comparaison des réponses à l'appel d'offre.

2.2.5- Critiques et améliorations possibles

Les critiques du logiciel d'évaluation sont de deux types : le premier est lié à la saisie des données, le deuxième est plus général et concerne son utilisation.

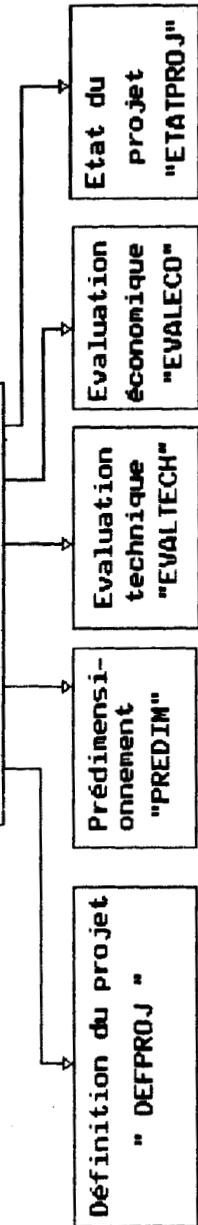
a- Saisie des données :

Les difficultés principales d'introduction des données concernent surtout les résultats d'essais in-situ. La saisie de la courbe pressiométrique ou de la courbe pénétrométrique se fait actuellement point par point en fonction de la profondeur : si la profondeur atteinte par l'essai est de 15 mètres l'introduction des caractéristiques mécaniques du sol dégagées de l'essai est réalisée tout les 50 cm, ce qui nécessite une saisie de 30 points en profondeur. Offrir la possibilité d'une saisie graphique de ces courbes facilitent considérablement la tâche de l'utilisateur.

b- Les problèmes d'utilisation :

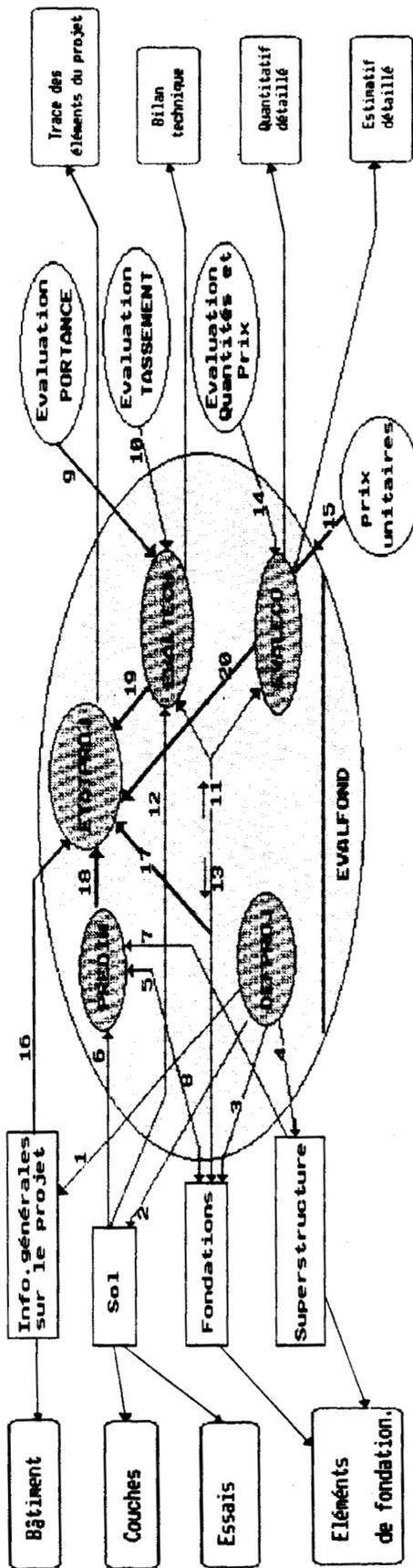
Le module "EVALTECH" permet l'évaluation technique de tous les éléments du projet suivant le critère de portance et le critère de tassement absolu. Le constat global du système de fondation est à déduire de ces évaluations. Il serait précieux d'intégrer un modèle géométrique du système de fondation qui permet d'automatiser la phase d'étude de la cohérence de l'ensemble d'éléments de la proposition. Une étude de l'influence du système proposé sur les constructions voisines serait alors possible. Certaines règles de constructibilité (à l'échelle de l'élément) sont actuellement intégrées, le modèle géométrique permet leur généralisation à l'échelle du système.

Evaluation des fondations "EVALFOND"



Fichiers

Bibliothèque de procédures paramétrées.



Légende

Définition du projet :

- 1 : Saisie d'informations générales sur l'ouvrage projeté.

Définition :

- 2 du sol de fondation,
- 3 des éléments de fondation,
- 4 et des éléments porteurs.

Prédimensionnement :

- 5 des éléments de fondation,
- 6 selon la résistance du sol,
- 7 et le type de l'élément porteur.
- 8 sauvegarde des dimensions de l'élément de fondation désigné.

Evaluation technique :

- 9 de la portance ou
- 10 du tassement
- 11 des fondations
- 12 selon le type du sol de fondation (le choix de la procédure est conditionné par la nature des couches et l'essai géotechnique)
- 13 sauvegarde des évaluations techniques de l'élément de fondation.

Evaluation économique :

- 14 calcul des quantités (procédure de calcul)
- 15 et des coûts par poste,
- 11 des éléments de fondation,
- 13 et sauvegarde des évaluations de l'élément de fondation.

Etat du projet :

- 16 le projet en cours,
- 17 les différents éléments de l'ouvrage,
- 18 en précisant le mode de création des éléments (prédimensionnés ou non),
- 19 L'état des évaluations techniques,
- 20 ainsi que l'état des évaluations économiques.

2.3- Le module de sélection :

Le développement d'un outil de sélection simple d'utilisation et présentant un point de départ d'une recherche sur l'intégration des méthodes de classement dans un système de C.A.O est notre objectif principal; Offrir la possibilité d'intégration de cet outil dans un système de c.A.O capable de générer des solutions de système de fondation représente l'objectif à long terme.

Ce module se compose de trois sous-modules (fig 27), et d'une bibliothèque d'opérations d'agrégation :

- Un sous-module de préparation de données.
- Un sous-module de génération d'une base de raisonnement déduite de la définition des différents objectifs.
- Un sous-module de calcul de performances des projets proposés vis-à-vis de chaque sous-objectif.

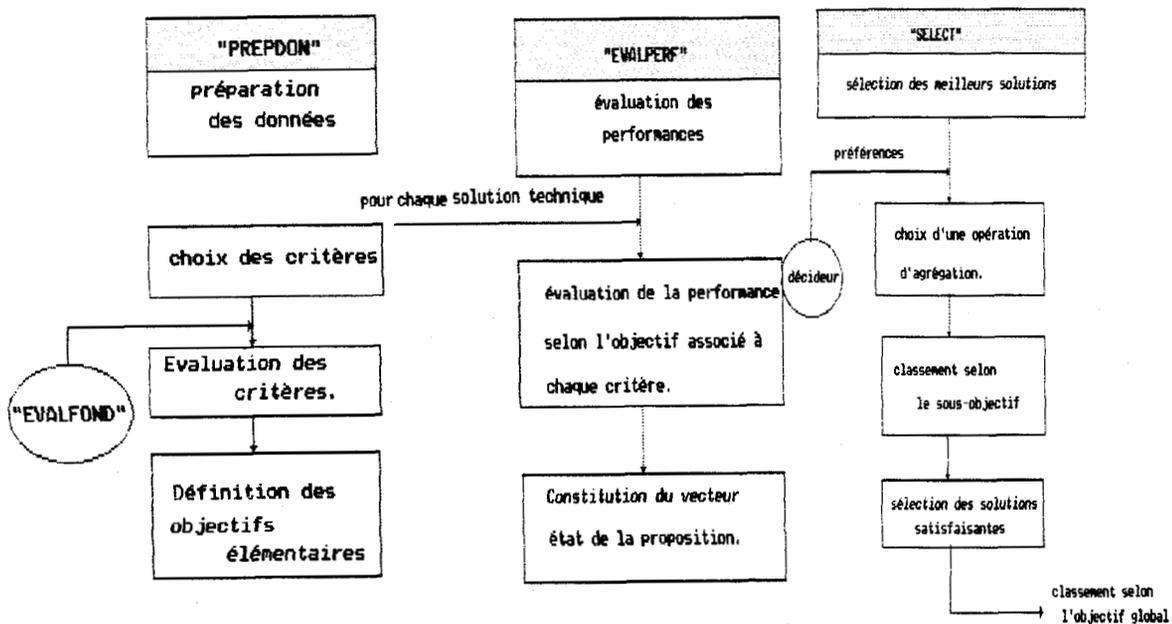


fig 27- Organisation du module de classement.

2.3.1- Préparation des données :

Les données concernent les valeurs des critères des projets à classer. Actuellement, les valeurs des critères de sécurité (stabilité et tassement) sont récupérées du logiciel d'évaluation ("EVALFOND"). Pour des raisons qui ont été citées précédemment, le critère économique est, de préférence, à introduire par l'utilisateur.

Deux niveaux sont prévus pour le critère économique :

1- Un premier niveau où le décideur souhaite comparer des projets avec le même type de fondation, le coût unitaire, par ml ou par m² selon le type de fondation utilisé, peut être suffisant à ce niveau.

2- Un deuxième niveau où l'on souhaite comparer des solutions de nature différente (Radier, semelle, etc...). Le critère économique devient le coût global de l'opération (ou le coût au m² surface hors d'oeuvre du bâtiment).

L'exemple :

Nous nous plaçons dans une phase primaire, où la descente de charges peut subir des modifications importantes. L'esquisse à ce niveau peu subir, elle aussi, des modifications notables.

La superstructure :

L'exemple traité concerne l'étude d'un projet de fondation dont la superstructure repose sur des voiles en B.A. Une étude rapide de la descente de charges prévoit une charge moyenne sur les fondations de 200 KN/ml (une contrainte totale de l'ordre de 65 KN/m²). Le bâtiment a une emprise au sol de 35 m sur 11 m.

Le sol :

L'étude géotechnique du sol a révélé l'existence d'une couche superficielle d'argile de l'ordre de 9 mètres. La reconnaissance s'est arrêtée à ce niveau. Les résultats d'un essai triaxial réalisé sur un échantillon prélevé à une profondeur de 4 mètres sont :

Cohésion = 40 Kpa et $\phi = 10^\circ$,
 le poids volumique humide du sol est de 19 KN/m³ ,
 et - - - - - sec - - - - - est de 16 KN/m³.
 la nappe phréatique est située à 2 m au-dessous du niveau du sol.

Les propositions :

Nous avons étudié plusieurs solutions par semelles fondées à différentes profondeurs entre (0.6 mètres et 2 mètres), pour des sections de base différentes (largeur de la semelle variant de 1 à 2 mètres). L'étude de la stabilité et du tassement a été réalisée en utilisant le logiciel "EVALFOND" de la maquette. Le tassement absolu des différentes semelles étant calculé, nous estimons le tassement différentiel à partir de ces valeurs du tassement absolu (40 %) pour tenir compte d'une éventuelle différence des charges apportées par la superstructure.

projet	type	portance (Kpa)	contrainte appliquée(Kpa)	distorsion
1	Semelle	378	126	1/430
2	-	410	135	1/410
3	-	380	100	1/510
4	-	375	100	1/530
5	-	366	100	1/480
6	-	390	90	1/550
7	-	350	105	1/520

Nous introduisons dans un premier temps, les données relatives aux différentes solutions possibles (fig 28) :

vous avez 7 occurrences d'objet

Fport	Ftass	Coût (KF)	Projet
3.00	0.71	70	1
3.10	0.68	90	2
3.80	0.85	108	3
3.75	0.88	105	4
3.60	0.80	100	5
4.30	0.92	118	6
3.30	0.87	100	7

Fport= portance/pression appliquée
 Ftass= tass diff. adm/tass prévisible
 cout = coût prévisible

fig 28- Caractéristiques des solutions par semelles.

Les objectifs :

a- Stabilité :

Nous pouvons nous contenter d'un coefficient de sécurité relatif à la portance du sol de 3. L'essai triaxial est adapté à des sols argileux, l'inconvénient de cette étude est quelle est basée sur un seul essai, d'autres essais auraient mieux précisés les caractéristiques du sol. Nous décidons donc la définition de cet objectif par l'ensemble du type L-R (3.5,8,0.5,2,1). Cette formulation signifie qu'un projet tel que le rapport de la portance sur la contrainte appliquée est supérieur à 3.5, est un projet parfaitement compatible avec notre objectif en matière de portance; et que si ce rapport est inférieur à 3 alors le projet est incompatible avec cet objectif. La représentation graphique de l'objectif est alors la suivante:

Objectif : "stabilité"

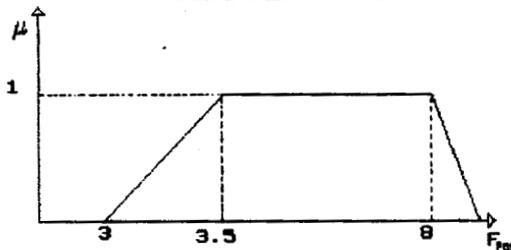


fig 29- Objectif "stabilité"

b- Tassement :

L'utilisation du module de reconnaissance du sol "SOLREC" précise que la profondeur atteinte par la reconnaissance est correcte en ce qui concerne une solution par semelles (la présence d'une couche très compressible sous la couche d'argile n'a pratiquement pas d'influence sur les valeurs du tassement calculées). Nous admettons comme admissible une distorsion comprise entre 1/600 et 1/400 pour tenir compte d'une éventuelle différence de report de charges vers les fondations; et nous rejetons des solutions où la distorsion est supérieure à 1/400 (fig 30).

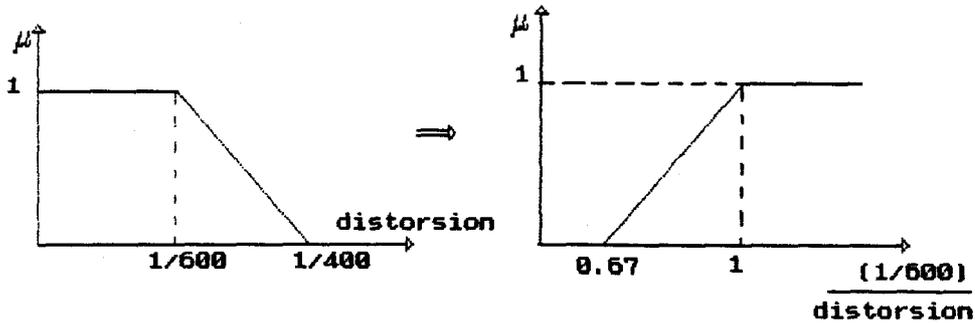


fig 30- L'objectif relatif au critère de tassement.

c- Le Coût :

Nous décidons d'introduire le coût global de chaque solution. Ce coût est déduit du coût par mètre linéaire, calculé à partir du module économique du logiciel "EVALFOND", après majoration pour tenir compte des postes qui ne sont pas pris en compte (terrassément, acier en attente, etc...). Nous supposons que le budget est de 90 KF avec une possibilité de majoration de l'ordre de 20 % (fig 31) :

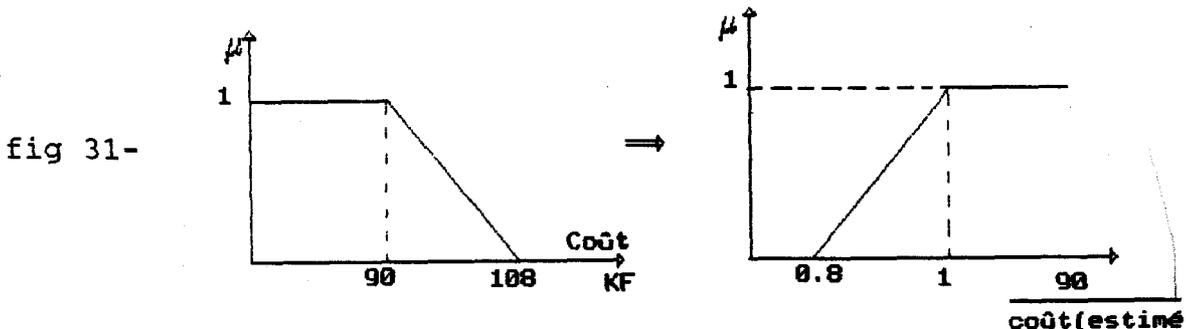


fig 31-

2.3.2 Base de raisonnement et performances

Nous présentons ici la base du raisonnement relatif à chaque objectif déclaré, déduite de la définition des objectifs :

$$F_{\text{port}} = \frac{\text{Portance}}{\text{Pression appliquée}} \quad F_{\text{tass}} = \frac{\text{distorsion admissible}}{\text{distorsion estimé}}$$

base du raisonnement

SECU-port	Fport	μ	
	3.00	0.0	plutôt incompatible
	3.13	0.25	faiblement compatible
	3.25	0.50	moyennement -
	3.38	0.75	plutôt compatible
	3.50	1.0	parfaitement -
	8.00	1.0	

μ : représente le degré de compatibilité avec l'objectif port

base du raisonnement

SECU-tass	Ftass	μ	
	0.67	0.0	plutôt incompatible
	0.75	0.25	faiblement compatible
	0.83	0.50	moyennement -
	0.92	0.75	plutôt compatible
	1.00	1.0	parfaitement -
	6.00	1.0	

μ : représente le degré de compatibilité avec l'objectif tass

base du raisonnement

ECO-coût	coût	μ	
	112	0.0	plutôt incompatible
	106	0.25	faiblement compatible
	100	0.50	moyennement -
	95	0.75	plutôt compatible
	90	1.0	parfaitement -
	69	1.0	

μ : représente le degré de compatibilité avec l'objectif coût

fig 32- Les hypothèses internes de raisonnement

La performance de chaque projet vis-à-vis de chaque objectif est évaluée à partir des hypothèses précédentes et codé numériquement de la manière suivante (fig 33) :

Evaluation des performances

SECU-port	Fport	μ
projet1	3.00	0.00
projet2	3.10	0.20
projet3	3.80	1.00
projet4	3.75	1.00
projet5	3.60	1.80
projet6	4.30	1.00
projet7	3.30	0.60

Portance

Evaluation des performances

SECU-tass	Ftass	μ
projet1	0.71	0.12
projet2	0.68	0.03
projet3	0.85	0.55
projet4	0.88	0.64
projet5	0.80	0.39
projet6	0.92	0.76
projet7	0.87	0.61

Tassement

Evaluation des performances

ECO-coût	coût	μ
projet1	70.00	1.00
projet2	90.00	1.00
projet3	108.00	0.17
projet4	105.00	0.29
projet5	100.00	0.50
projet6	118.00	0.00
projet7	100.00	0.50

Coût

fig 33- Performances des projets.

2.3.3- Jugement du décideur et agrégation

Nous évaluons, dans un premier temps la performance des projets au sens du sous-objectif "sécurité" : la sélection d'une opération d'agrégation adéquate est réalisée suite au dialogue avec l'utilisateur, celui-ci doit préciser le degré de compromis possible entre les deux critères (portance / tassement); pour cela il doit donner son avis sur des solutions "types" (fig 34). Certaines attitudes du décideur peuvent être interprétées à partir de plusieurs opérations d'agrégation; Dans ce cas nous présentons le classement correspondant à chaque opération.

OBJECTIF : Evaluation des projets
au sens de plusieurs critères

intervention du décideur par ses préférences

1 tres mauvais
2 mediocre
3 assez bien
4 bien
5 tres bien

Quelle est votre appréciation sur un projet

tel que : Fport < 3.0 votre appréciation : 1
 Ftass > 1.0

 Fport = 3.3 votre appréciation : 3
 Ftass = 0.8

 Fport = 3.3 votre appréciation : 3
 Ftass > 1.0

fig 34- Jugement du décideur

Le triplet de réponse (1-3-3) indique que les deux critères ont pratiquement le même poids, et que le compromis n'est pas admis; dans ce cas, la conjonction d'objectifs simule cette attitude (opération "MIN", fig 35). Nous supposons, donc, que les projets ont été relativement bien notés au sens du critère de portance et celui du tassement.

- $\mu(\text{port})$ degré de satisfaction du projet avec l'objectif élémentaire "PORTANCE"
- $\mu(\text{tass})$ degré de satisfaction du projet avec l'objectif élémentaire "TASSEMENT"
- $\mu(\text{SECU})$ degré de satisfaction du projet avec le sous-objectif "SECURITE" composé des deux objectifs élémentaires précédents.

Evaluation performance
 objectif: sécurité (Portance,tassement)

port-tass	$\mu(\text{port})$	$\mu(\text{tass})$	$\mu(\text{sécu})$
projet1	0.00	0.12	0.00
projet2	0.20	0.03	0.03
projet3	1.00	0.55	0.55
projet4	1.00	0.64	0.64
projet5	1.00	0.39	0.39
projet6	1.00	0.76	0.76
projet7	0.60	0.61	0.60

Les propositions :

 projet1
 projet2

ne semblent pas répondre à l'objectif sécurité

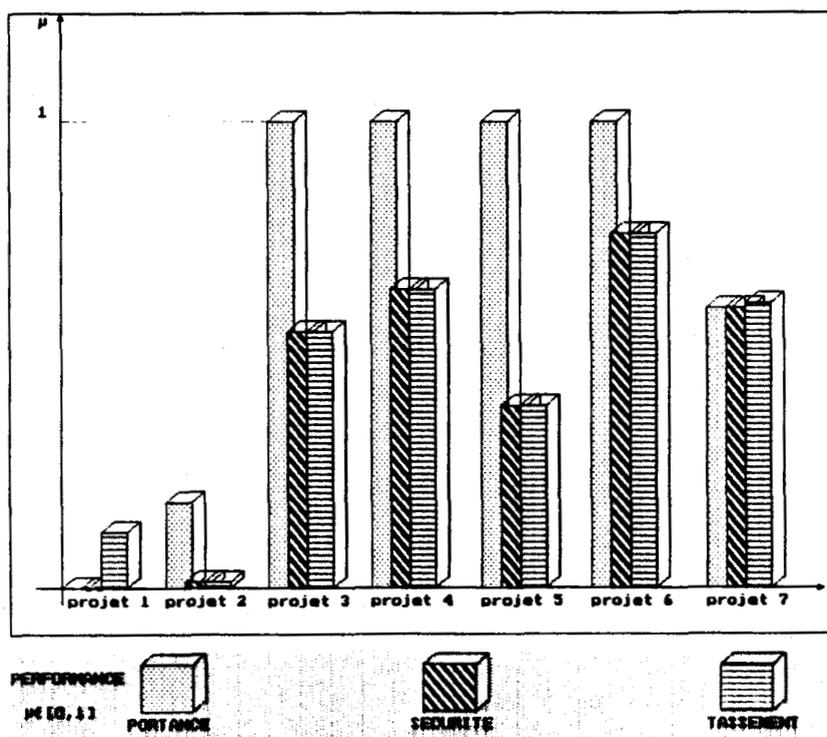


fig 35

L'évaluation des projets au sens de ce sous-objectif élimine les deux projets 1 et 2 qui représente un degré de satisfaction médiocre au sens de l'objectif élémentaire "PORTANCE".

Remarque : Le triplet de réponses relatif aux trois solutions types dépend essentiellement du choix des objectifs : les fonctions d'appartenance associées aux objectifs ont pour rôle principal la détermination du caractère critique des critères; si les objectifs sont formulés de manière peu exigeante, l'agrégation se réduit à une conjonction, par contre le compromis peut être envisagé dans le cas où les objectifs sont très sélectifs.

Ayant éliminé les projets qui sont plutôt incompatibles avec le sous-objectif "SECURITE", nous exprimons une attitude relativement compromettante entre le critère économique et l'évaluation relative à la "SECURITE" déduite de la phase précédente; cette attitude peut être décrite, par exemple, par le triplet de réponse 1-3-4); le classement selon l'objectif global est le suivant (fig 36) :

classement au sens de l'objectif "qualité"

secu-eco	$\mu(\text{sécu})$	$\mu(\text{eco})$	$\mu(\text{glob})$
projet7	0.60	0.50	0.55
projet5	0.39	0.50	0.44
projet4	0.64	0.29	0.43
projet3	0.55	0.17	0.30
projet6	0.76	0.00	0.00

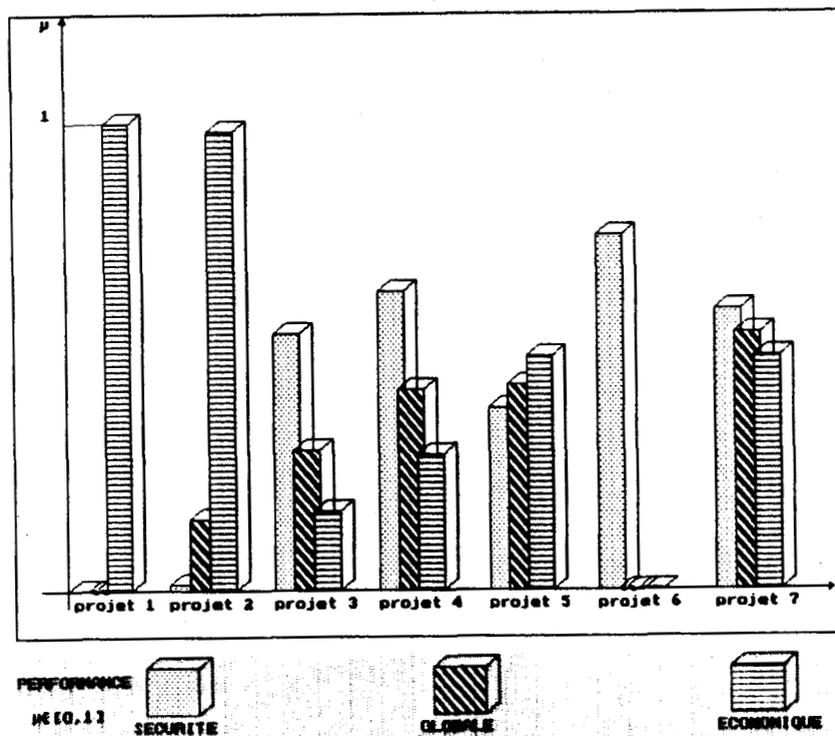


fig 36

Le projet 6 a été éliminé à cause de son coût élevé même s'il se trouvait en tête lors du classement précédent selon le sous-objectif "SECURITE". Nous observons donc le classement final 7-5-4-3 .

2.3.4- Sensibilité de la méthode et conclusion

Nous reprenons le même exemple et nous décidons d'exprimer un certain compromis entre les deux critères: portance et tassement; ce compromis peut être justifié par le fait que les deux objectifs relatifs à ces deux critères sont formulés d'une manière sévère (respect de la réglementation dans tous les cas). Dans ce cas l'opérateur sélectionné doit se trouver entre l'opérateur "MIN" et l'opérateur "MAX". Ce souhait peut se traduire par le triplet (1-3-4),

OBJECTIF : Evaluation des projets
 au sens de plusieurs critères

 intervention du décideur par ses préférences

- 1 tres mauvais
- 2 mediocre
- 3 assez bien
- 4 bien
- 5 tres bien

Quelle est votre appréciation sur un projet

tel que : $f_{port} < 3.0$
 $f_{tass} > 1.0$ votre appréciation : 1

$f_{port} = 3.3$
 $f_{tass} = 0.8$ votre appréciation : 3

$f_{port} = 3.3$
 $f_{tass} > 1.0$ votre appréciation : 4

Cette attitude du décideur s'exprime par deux opérations d'agrégation mais le classement relatif au sous-objectif "SECURITE" est le même (les valeurs du degré de compatibilité des objets avec le sous-objectif "SECURITE" sont légèrement améliorées).

Classement au sens de l'objectif securité

projet	$\mu(\text{port})$	$\mu(\text{tass})$	$\mu(\text{secur})$
projet6	1.00	0.76	0.86
projet4	1.00	0.64	0.78
projet3	1.00	0.55	0.71
projet7	0.60	0.61	0.60
projet5	1.00	0.39	0.57
projet2	0.20	0.03	0.05
projet1	0.00	0.12	0.00

Classement au sens de l'objectif securité

projet	$\mu(\text{port})$	$\mu(\text{tass})$	$\mu(\text{secur})$
projet6	1.00	0.76	0.87
projet4	1.00	0.64	0.80
projet3	1.00	0.55	0.74
projet5	1.00	0.39	0.63
projet7	0.60	0.61	0.60
projet2	0.20	0.03	0.08
projet1	0.00	0.12	0.00

En observant la même attitude quand à la combinaison de l'objectif économique avec le sous-objectif "SECURITE", le classement final devient :

classement au sens de l'objectif "qualité"

secu-eco	$\mu(\text{sécu})$	$\mu(\text{eco})$	$\mu(\text{glob})$
projet7	0.60	0.50	0.55
projet5	0.57	0.50	0.53
projet4	0.78	0.29	0.47
projet3	0.71	0.17	0.34
projet6	0.86	0.00	0.00

L'observation d'une attitude très compromettante entre les deux critères de sécurité (par exemple : triplet 5-3-5) conduit à une agrégation par l'opérateur "MAX";

A partir de cet exemple simple, nous pouvons dégager les remarques suivantes :

1- L'utilisation de cette méthode exige une formulation des objectifs élémentaires techniques de telle manière que la réglementation soit satisfaite. Certes La valeur minimale de satisfaction doit être supérieure à la valeur réglementaire, mais aussi la valeur minimale du domaine d'évaluation (formulation des objectifs). Dans ces conditions le compromis entre les objectifs peut être envisagé.

2- Il convient de rejeter les propositions qui ne semblent pas répondre au sous-objectif "SECURITE" avant d'engager l'agrégation qui résulte d'une combinaison de ce sous-objectif avec l'objectif économique : Le non-rejet de certaines solutions peut les favoriser lors de la prise en compte du critère économique si ces solutions s'avèrent moins coûteuses que celles qui répondent mieux au sous-objectif sécurité. Un projet de qualité est un projet qui satisfait le sous-objectif "SECURITE" et qui n'est pas très coûteux;

3- La nature symétrique des opérations d'agrégation, exige une formulation attentive des objectifs élémentaires. L'importance d'un critère par rapport à un autre s'exprime essentiellement par la forme du sous-ensemble flous représentant l'objectif qui lui est associé.

4- L'utilisation pratique de cette méthode devient plus compliquée quand l'évaluation agrégée partielle (évaluation du sous-objectif "SECURITE") est à son tour combinée avec d'autres évaluations (le coût dans notre exemple).

2.4- Perspectives :

L'évolution de la maquette peut être envisagée sous deux formes : L'évolution du logiciel d'évaluation des fondations "EVALFOND" et de l'outil de sélection "CLAS1".

* L'utilisation pratique de la maquette en terme d'évaluation a permis de faire les constatations suivantes :

- Difficulté d'utilisation de la modélisation du sol résidant essentiellement dans la saisie des données relatives aux essais in-situ. Une saisie graphique des courbes d'essais facilite considérablement cette phase. Son utilisation efficace nécessite la connaissance des hypothèses internes qui n'apparaissent pas toujours d'une manière suffisante.

- L'intégration d'autres essais géotechniques permettant l'évaluation technique des éléments de fondation, peut élargir le champ d'application de l'outil.

- L'intervention permanente de l'utilisateur lors de l'évaluation technique des éléments du système de fondation, peut nuire à sa souplesse : Les conséquences d'une modification d'une partie du projet ne sont gérées que dans certains cas. D'une manière générale, l'utilisation d'une base de données relationnelles pourrait apporter plusieurs réponses aux problèmes pratiques posés lors de l'utilisation de la maquette. Les relations entre les différents éléments du projet seront aborder de manière à décharger le plus possible l'utilisateur de la gestion de ces modifications.

Concernant les hypothèses générales d'évaluation technique, il convient de considérer le cas des charges excentrées. Ceci nécessite une modification des procédures d'évaluation; en effet l'évaluation de la portance dans ce cas fait intervenir des coefficients correcteurs pour tenir compte de l'excentrement.

Une modélisation plus globale du sol est plus difficile à envisager dans la maquette, telle qu'elle est actuellement. une révision plus profonde de l'organisation des données et la structure de la maquette serait nécessaire.

Le couplage de la maquette avec un modèle géométrique de la structure permettrait la déduction d'éléments importants qui concernent la cohérence de l'ensemble du système de fondation (tassement différentiel, influence des fondations les unes sur les autres...).

* Concernant la méthode de sélection retenue, la difficulté principale d'utilisation réside en la formulation des objectifs associés aux critères étudiés; nous n'avons pas essayé de quantifier les degrés d'appartenance lors de la définition des objectifs : seuls, quelques éléments qui conditionnent la définition des fonctions d'appartenance ont été étudiés ici. Une étude plus détaillée sur l'aide à la formulation des objectifs est actuellement en cours.

Le cas d'évaluations imprécises des critères est envisagé actuellement par une modulation des objectifs relatifs à ces critères (si l'évaluation du tassement par exemple ne s'avère pas fiable alors , l'objectif relatif à ce critère est très strict...). Il serait précieux de prendre en compte l'imprécision des évaluations des critères d'une manière directe : représentation de ces évaluations par des sous-ensembles flous. Dans ce cas, la méthode retenue reste valable d'un point de vue méthodologique, les difficultés proviennent essentiellement de la manipulation des sous-ensembles flous pour dégager une évaluation de l'objectif global.

CONCLUSION de la troisième partie

Nous avons montré dans cette partie, qu'il était possible de développer un outil d'évaluation rapide d'une proposition d'un système de fondation. Les résultats de cet outil peuvent représenter les données nécessaires à un outil plus décisionnel basé sur la description des objectifs par l'intermédiaire de sous-ensembles flous.

Les outils que nous venons de présenter sont des tentatives de réponse au cahier des charges dressé dans la première partie. Les hypothèses simplificatrices proposées sont généralement admissibles dans une phase d'avant projet et la structure de la maquette permet son extension à des étapes plus avancées dans le processus de conception du projet de fondations. L'observation de la manière de travailler des concepteurs dans le domaine, montre la concordance de la démarche proposée avec les pratiques courantes.

Notons pour terminer, que l'intégration de cette maquette dans un système de C.A.O bâtiment permettrait de tirer des conclusions objectives quant à son efficacité dans une approche globale de la conception des bâtiments.

CONCLUSION

C O N C L U S I O N

* Notre recherche sur le thème de l'aide à la conception et à la décision pour les fondations de bâtiment nous a conduit à travailler sur deux objectifs complémentaires; le premier est basé sur une approche plutôt prévisionnelle et vise à fournir au concepteur des évaluations techniques et économiques d'une proposition d'un système de fondation; le second, basé lui sur une approche plus décisionnelle, tend à guider le projetteur dans le choix d'une solution parmi plusieurs variantes possibles.

Depuis l'idée de la construction jusqu'au choix d'une solution argumentée et stable, le système de fondations fait l'objet d'études de but et de forme variées. Tout d'abord, il s'agit de la programmation d'une campagne de reconnaissance qui soit suffisante pour tirer des conclusions sur le comportement du sol sous l'ouvrage projeté, et de l'analyse de cette campagne pour proposer une ou plusieurs variantes. L'évaluation technique permet, ensuite, de rejeter ou de valider chacune de ces variantes. Enfin, la dernière tâche consiste à choisir une solution parmi les variantes admissibles au regard de critères techniques et économiques. Ce sont à ces diverses actions que nous avons apporté des éléments de réponse présentés tout au long de ce document.

* Ces éléments de réponse présentent plusieurs aspects:

Un aspect fondamental par la mise en place d'un schéma conceptuel nouveau, en harmonie avec une vision multi-technique de l'aide à la conception, par une synthèse de la réglementation et des pratiques de vérification et de dimensionnement et par une formulation de la problématique de l'aide à la décision dans le contexte de l'infrastructure des bâtiments .

De plus ces études nous ont amené à mettre au point et/ou à adapter des méthodes pour que celles ci deviennent compatibles avec le niveau de conception concerné, la qualité des informations manipulées et l'objectif qui leur a été assigné. Ce travail concerne le champ technique (détermination d'une profondeur de reconnaissance, vérification de la portance et du tassement, dimensionnement des éléments,..) le champ économique (évaluations rapides ou détaillées) mais aussi le champ des méthodes d'aide à la décision (adaptation de la prise en compte des informations floues).

Enfin, nos deux objectifs initiaux se sont concrétisés par deux outils; un outil prévisionnel permet d'évaluer les propositions d'un système de fondation; un deuxième outil a pour rôle principal d'aider le concepteur et le projeteur à choisir une solution répondant le mieux à ses objectifs.

En terme de développements futurs, nous pouvons considérer deux axes de travail : la maquette et la méthodologie.

* Le contenu de la maquette est suffisant pour une utilisation professionnelle, son développement nécessite, cependant, une refonte de sa forme. Pour une utilisation professionnelle couplée avec un système de C.A.O, il est nécessaire de faire une étude spécifique de la compatibilité du schéma conceptuel avec les structures de données contenues dans le système de C.A.O utilisé en amont (comme générateur de solution structure, modeleur graphique) ou en aval (comme préparation des plans d'exécution ou des avant-métrés et descriptifs...)

Pour que la maquette puisse être utilisée, il faut qu'elle soit connectée structurellement à une modélisation du sol plus générale et à une modélisation géométrique tridimensionnelle; son utilisation sera, alors, de générer et d'évaluer des variantes à partir d'une solution originale dans l'optique d'une étude comparative des méthodes de sélection, d'études de sensibilité des critères aux variables de commande dans le but d'optimiser la solution.

* L'extension de la méthodologie à d'autres objets (ouvrages d'art, soutènement...) et à l'environnement du bâtiment nécessite, essentiellement, le couplage d'un modèle géométrique de la structure et d'une description plus générale du sol et du terrain. Pour que l'on puisse vraiment parler d'aide à la génération et au choix de solution du système de fondation, il faudrait étudier l'apport d'une modélisation continue du sol et introduire des règles expertes formalisant le savoir faire des concepteurs.

ANNEXES

Annexe 1 : Structuration des données adoptée dans "EVALFOND".

SCHEMA GENERAL

LE SOL
=====

1- Description d'une COUCHE du sol

epcouche :real; { réel : épaisseur de la couche en mètres }
profnappe :real; { réel : profondeur de la nappe dans la couche
en mètres. 0 si nappe à la surface }
pendcouche:real; { réel : pendage en degrés }
natcouche :integer; { entier: nature de la couche }
poids :real; { réel : poids spécifique humide du sol }
numcouche:integer; { entier: numéro de la couche }

2- Description d'un essai TRIAXIAL

cohesion:real; { réel : cohésion du sol en Kpa }
angle:real; { réel : angle de frottement interne du sol
en degrés }
prof:real; { réel : profondeur de l'échantillon dans la
couche en mètres }
numessai:integer; { entier: numéro de l'essai }

3- Description d'un essai de COMPRESSION SIMPLE

cohh:real; { réel : cohésion horizontale en Kpa }
cohv:real; { réel : - verticale - - }
coh45:real; { réel : - à 45 degrés - - }
prof:real; { réel : profondeur de l'échantillon dans
la couche }
numessai:integer; { entier: numéro de l'essai }

4- Description d'un essai PRESSIOMETRIQUE

numessai:integer; { entier : numéro de l'essai }
profpress:real; { réel : profondeur atteinte par
le pressiomètre en mètres.
par rapport au terrain naturel.
maxi = 25 mètres }
eh:array[1..50] of real; { tableau: valeurs du module pressio
tous les 50 cm en Kpa }
pl:array[1..50] of real; { tableau: valeurs de la pression limite
tous les 50 cm en Kpa }

5- Description d'un essai PENETROMETRIQUE

numessai:integer; { entier : numéro de l'essai }
profess:real; { réel : profondeur atteinte par le
pénétrömètre en mètres/T.N
maxi = 25 mètres }
rpen:array[1..50] of real; { tableau: valeurs de la résistance de
pointe tous les 50 cm en Kpa }
qfrot:array[1..50] of real; { tableau: valeurs du frottement latérale
unitaire tous les 50 cm en KN }

6- Description d'un essai OEDOMETRIQUE

sig:array[1..10] of real; { tableau: valeurs de la contrainte totale
lues sur la courbe Oedo
en Kpa ** maxi 10 ** }
evide:array[1..10] of real; { tableau: valeurs de l'indice des vides
lues sur la courbe Oedo }
ev0 : real; { réel : valeur de l'indice des vides
initial }
numessai:integer; { entier : numéro de l'essai }

Les OBJETS du SYSTEME de FONDATION

7- Description d'une SEMELLE

lsem,bsem:real; { réels : longueur et largeur de la semelle
en mètres }
dsem:real; { réel : profondeur de la semelle/TN }
epsem,hsem:real; { réels : épaisseur totale et hauteur en rive
de la semelle - en mètres- }
lstruct,bstruct:real; { réels : grande dimension et petite dimension
du poteau ou du mur }
fstruct,fult:real; { réels : charge à l'ELS et à l'ELU apportée par
le poteau ou le mur.
unités : Kn et m }
lpieux:real; { réel : spécifique aux semelles sur pieux
entraxe des pieux - en mètres- }
bpieu:real; { réel : diamètre des pieux supposés identiques }
numpieux:array[1..4] of integer; {tableau: numéros des pieux sous la
semelle (maxi 4 pieux) }
gadsem,wsem:real; { réels : valeurs des évaluations techniques
gadsem= contrainte admissible en Kpa
wsem = tassement absolu en cm }
acier,beton:real; { réels : poids d'acier en kg et volume
du béton en m3 }
prop,coffrage:real; { réels : béton de propreté en m2 et surface de
coffrage en m2 }
natsem:string[7]; { chaîne de caractère : nature de la semelle
isolee ,filante,semnp }
numsem:integer; { entier : numéro de la semelle }

8- Description d'un RADIER

```

lrad,brad:real;      { réels : longueur et largeur du radier
                    { réels : profondeur du radier/TN en mètres }
                    { réel : épaisseur du radier }
drad:real;           { réel : épaisseur du radier }
hrad:real;           { réel : épaisseur du radier }
fstruct,fult:real;  { réels : pression appliquée sur le radier
                    { réels : pression appliquée sur le radier
                    évaluée à l'ELS et à l'ELU en Kpa }
qadrad,wrad:real;   { réels : valeurs des évaluations techniques
                    qadsem= contrainte admissible en Kpa
                    wsem = tassement absolu en cm }
acier,beton:real;   { réels : poids d'acier en tonne et volume
                    du béton en m3 }
prop,coffrage:real; { réels : béton de propreté en m2 et surface de
                    coffrage en m2 }
natrad:string[7];   { chaîne : type du radier ' épais ' ou 'nervuré' }
numrad:integer;     { entier : numéro du radier }

```

9- Description d'un PUIT

```

lpuit,bpuit:real;   { réels : longueur et largeur du puit si rectan.
                    lpuit=bpuit= diamètre puit si circu.
                    en mètres }
dpuit:real;         { réel : profondeur du puit/T.N en mètres }
hpuit:real;         { réel : épaisseur du puit en mètres }
fstruct,fult:real;  { réels : charge à l'ELS et à l'ELU apportée par
                    la superstructure en Kn }
gadpuit,wpuit:real; { réels : contrainte admissible (en Kpa)
                    et tassement du puit en cm }
acier,beton:real;   { réels : poids d'acier en tonne et volume
                    du béton en m3 }
prop,coffrage:real; { réels : béton de propreté en m2 et surface de
                    coffrage en m2 }
natpuit:string[13]; { chaîne : nature du puit : ' circulaire ' ou
                    'rectangulaire' }
numpuit:integer;    { entier : numéro du puit }

```

10- Description d'un PIEU

```

bpieu :real;        { réel : diamètre du pieu en mètres }
dpiEU :real;        { réel : profondeur du pieu/T.N en mètres }
hpieu :real;        { réel : longueur du pieu en mètres }
fstruct,fult:real;  { réels : charge à l'ELS et à l'ELU apportée
                    par la superstructure en Kn }
natpieu :integer;   { entier : Type de pieu
                    1 si métallique 2 si béton }
execpieu:integer;   { entier : dépendant du mode d'exécution
                    1 si foré ou micropieu type I
                    2 si battu,vissé ou micro. type II }
etatpieu:integer;   { entier : 0 si pieu isolé
                    numéro du groupe si le pieu fait
                    partie d'un groupe de pieux }
gadpieu,wpieu:real; { réels : Capacité nominale (en Kpa)
                    et tassement du pieu en cm si groupe }
coutpieu : real;    { réel : lactuellement le cout est évalué
                    à partir d'un prix forfaitaire au ml }
numpieu:integer;    { entier : numéro du pieu }

```

11- Description d'un GROUPE DE PIEUX

```
nbpieux:array[1..40] of integer; { tableau : contient les numéros des
                                  pieux constituant le groupe }
lmaille:real;                      { réel    : longueur de la maille }
bmaille:real;                      { réel    : largeur de la maille
                                  en mètres }
numgroupe:integer;                 { entier  : numéro du groupe }
```

12- Description d'une poutre : liaison ou longrine

```
natpout :string[8];               { chaîne : nature de la poutre
                                  'longrine' ou 'liaison ' }
fstruct,fult:real;                { réels  : charge à l'ELS et à l'ELU en Kn/ml
lpout :real;                       { réel   : longueur de la poutre en mètres }
bpout :real;                       { réel   : largeur de la poutre en mètres }
hpout :real;                       { réel   : épaisseur de la poutre }
typ :integer;                      { réel   : type des éléments liés : pieux,semelles..
                                  1 si liaison entre semelles
                                  2 si liaison entre pieux }
elemi,elemf:integer;              { entiers: numéros des éléments de fondation à lier }
acier,beton:real;                 { réels  : poids d'acier en tonne et volume
                                  du béton en m3 }
prop,coffrage:real;               { réels  : béton de propreté en m2 et surface de
                                  coffrage en m2 }
numpout:integer;                   { entier : numéro de la poutre }
```

Annexe 2 : Hypothèses générales sur le sol de fondation

a- Valeurs par défaut des caractéristiques des sols.

SOL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

caractéristique										

Cohésion (Kpa)	1000	500	5	5	10	0	0	5	5	0

Angle de frottement (degrés)	45	40	10	20	20	30	35	25	10	25

Poids volumique (KN/m3)	22	21	17	19	19	18	19	18	17	18

Module d'élasticité (Mpa)	55	30	2	2	12	10	10	4	2	5

Contrainte admissible (Kpa)	800	500	40	80	300	-	350	-	-	-

SOL

- 1 Roche dure.
- 2 Roche altérée.
- 3 Argile molle.
- 4 Argile moyennement consistante.
- 5 Argile très consistante.
- 6 Sable argileux.
- 7 Sable et gravier.
- 8 Limons.
- 9 Vases et tourbes.
- 10 Hétérogène.

b- Les caractéristiques mécaniques du sol

Lorsque l'utilisateur introduit les caractéristiques mécaniques du sol, il convient de prendre en considération la nature du sol et la profondeur de la nappe éventuelle :

- * Nappe très profonde : il convient d'utiliser la cohésion sèche (C) et l'angle de frottement interne (Φ).
- * Nappe peu profonde : c'est la cohésion drainée (C') et l'angle de frottement interne (Φ') qu'il convient d'introduire.
- * Nappe à la surface du sol : dans ce cas on utilise la cohésion non-drainée (C_u).

Dans le cas où le sol est composé d'enrochements, de graviers ou de sables, on peut utiliser les caractéristiques non-drainées puisque le drainage s'effectue rapidement.

Si le sol est composé d'argile humide non saturé ou sèche les caractéristiques avant et après drainage sont du même ordre de grandeurs.

Concernant le poids volumique l'utilisateur peut introduire un seul poids volumique pondéré drainé (γ').

Le module de Young (E) et le coefficient de Poisson peuvent être déterminés à partir d'un essai de compression simple ou un essai triaxial. Si on possède la valeur du module oedométrique (E_{oed}), le module d'Young est déterminé de la manière suivante :

$$\cdot \text{ sable, gravier, argile sèche : } E = E_{oed} \frac{(1-\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

$$\cdot \text{ Argiles saturées : } E' = E_{oed} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

Annexe 3 : Méthodes de calcul de la portance.

Dans cette annexe, nous présentons les méthodes retenues pour le calcul de la portance dans le modèle "EVALFOND".

I- Fondations superficielles

A- Essai TRIAXIAL ou à la BOITE :

Cas 1-

. Le sol est homogène et naturel.

$$q_d = \alpha [c.N_c + 0.5 \gamma.B.N_\gamma + \gamma.D.N_q]$$

La profondeur minimale en dessous de laquelle, le sol peut être considéré comme d'épaisseur infinie varie avec ϕ et avec la largeur de la fondation. La relation $H_{min}/B = f(\phi)$ a été proposée par GIROUD et al [50]. Nous retenons l'expression analytique proposée par [3-BOISSIER] :

$$H_{min}/B = 0.6894 e^{[1.46485 \tan(\phi)]}$$

Cas 2-

. Le sol est homogène, purement cohérent

On a retenu pour ce cas l'hypothèse de SKEMPTON (cisaillement au dessous du plan de fondation) :

pour D = 0	$q_d = (2+\pi).C$] semelle filante
D/B < 5	$q_d = (2+\pi).C + 0.47 C.D/B$	
D/B > 5	$q_d = 7.5 C$	
D = 0	$q_d = 6.4 C$] semelle isolée
D/B < 5	$q_d = (6.4 + 0.6 D/B).C$	
D/B > 5	$q_d = 9.4 C$	

Cas 3-

. Le sol est stratifié

. Hypothèses : Le sol est constitué de fines strates parallèles alternant avec des couches plus épaisses :

couches fines : C, ϕ
couches épaisses : $C, \phi,$

l'épaisseur des couches fines est petite devant celle des couches épaisses et devant la largeur B.

Nous supposons que $C.tg(\phi^-) = C^-.tg(\phi)$

- si $\phi > \phi^- > 0$: $q_d = k.q_1$

où q_1 est la portance calculée comme si le sol était homogène d'épaisseur ∞ à partir de C et ϕ .

et k est un coefficient de réduction tabulé par GIROUD. Nous utilisons l'expression suivante :

$$k = a.e^{[b(\phi-\phi^-)]}$$

avec $a = 1.073$ et $b = -0.031 \text{ degré}^{-1}$

$\phi-\phi^-$	5	10	15	20	25	30	35	40
---------------	---	----	----	----	----	----	----	----

k(abaque)	0.88	0.78	0.69	0.6	0.52	0.44	0.37	0.31
-----------	------	------	------	-----	------	------	------	------

k(approx)	0.92	0.79	0.67	0.58	0.49	0.42	0.37	0.31
-----------	------	------	------	------	------	------	------	------

- si $\phi > \phi^- = 0$: $q_d = C.N^{\circ}_\sigma + \gamma.D$

$$\text{où } N^{\circ}_\sigma = 2 \left[1 + \sqrt{1 - (C^-/C)^2} + \text{Arcsin}(C^-/C) \right]$$

Cas 4-

. Le sol est très compressible

Dans ce cas nous utilisons la méthode proposée par Terzaghi : nous prenons un angle de frottement ϕ réduit une cohésion tels que :

$$tg(\phi') = (2/3)tg(\phi) \text{ et } C' = (2/3)C$$

Cas 5-

. Le sol est homogène et naturel.

. La couche est d'épaisseur limitée (H_σ) :

Une couche est considérée d'épaisseur limitée si

$$H_\sigma < H_{min} \text{ avec } H_{min} = B 0.6894 e^{[1.46485.tg(\phi)]}$$

La portance dans ce cas peut s'écrire :

$$q_d = C.N_\sigma.a_\sigma + 0.5 B.\gamma.N_\gamma.a_\gamma + \gamma.D.N_\sigma.a_\sigma$$

Mandel et Salençon ont tabulés a_σ , a_γ , a_σ
avec $a_\sigma = a_\sigma - (a_\sigma - 1)/N_\sigma$

Nous utilisons pour ces coefficients l'approximation suivante en fonction de B/H :

$$a_c = \alpha_c(\Phi) \cdot e^{[B \cdot \beta(\Phi)/H]}$$

$$\text{et } a_\gamma = \alpha_\gamma(\Phi) \cdot e^{[B \cdot \beta(\Phi)/H]}$$

Φ	10°	20°	30°	40°
α_c	0.79	0.45	0.24	0.185
β_c	0.175	0.51	1.62	2.15
α	0.5	0.33	0.066	0.056
β	0.11	0.35	1.54	2.05

Cas 6-

- . Le sol est homogène purement cohérent.
- . La couche est d'épaisseur limitée (H_c) :

La formule proposée pour le cas précédent est appliquée avec $a_\alpha = a_\gamma = 1$ et
 $a_c = 0.83 + 0.096(B/H)$

Cas 7-

- . Le sol est un bicouche (partie II chapitre 2).

B- Essai de COMPRESSION Simple :

- . Le sol est purement cohérent anisotrope.
- . Hypothèse: la sol est considéré comme homogène, purement cohérent, anisotrope, d'épaisseur infinie. Sa cohésion est caractérisée par C_{uv} , C_{uh} , C_{u45} obtenus par des essais de compression simple suivant des directions verticales (C_{uv}), horizontales (C_{uh}) et à 45 degrés (C_{u45}).
 dans ce cas : $q_d = 0.5 (C_{uv} + C_{uh}) \cdot N^{\circ}_c + \gamma \cdot D$
 N°_c est fonction uniquement de $r = C_{u45} / \sqrt{C_{uv} \cdot C_{uh}}$
 Nous retenons pour N°_c les expressions proposées par [50] :

$$N^{\circ}_c = 2[1 + \text{Arcsin}(r) \cdot \sqrt{r} + \sqrt{1-r^2}] \quad \text{si } r < 1$$

$$N^{\circ}_c = 2 + \pi \quad \text{si } r = 1$$

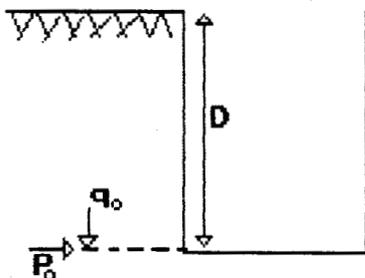
$$N^{\circ}_c = 2[1 + \text{Arcsin}(1/r) \cdot \sqrt{r} + \sqrt{r^2-1}] \quad \text{si } r > 1$$

Dans le cas où le sol est purement cohérent homogène, les formules proposées dans le cas d'un essai triaxial restent valables (épaisseur de la couche infinie ou limitée).

C- Essai au PRESSIOMETRE Menard :

Catégories des sols selon MENARD :

Catégorie	nature du sol
I	Argile - Limon
II	Argile raide et marne Limon compacts Sable compressible Roche tendre ou altérée.
III	Sable et Gravier, Roche.
IIIbis	Sable et Gravier très compact.



Sol homogène :

La portance s'écrit sous la forme $q_d = q_0 + k(P_1 - P_0)$

où P_0 = contrainte horizontale initiale du sol au repos.

q_0 = - verticale totale initiale du sol au niveau de la fondation.

k = facteur de portance.

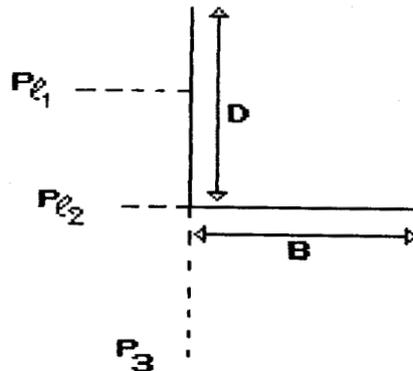
Le coefficient k dépend de l'ancrage D , de la forme de la fondation, et de la nature du sol.

on a retenu pour k les valeurs suivantes :

Catégorie du sol		I	II	III	IIIbis
D/B					
Filante	0	0.8	0.8	0.8	0.8
	0.5	1	1.1	1.2	1.3
	1	1.2	1.3	1.4	1.6
	1.5	1.2	1.4	1.6	1.8
carrée	0	0.8	0.8	0.8	0.8
	0.5	1.3	1.45	1.8	2.1
	1	1.6	1.8	2.5	2.8
	1.5	1.8	2.1	3	3.3

Sol hétérogène :

Les formules utilisées pour les sols homogènes restent valables en remplaçant P_1 par P_{1e} ou $P_{1e} = \sqrt[3]{P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13}}$ avec P_{11} , P_{12} , P_{13} sont les pressions limites obtenues distance B au dessus du niveau de fondation, au niveau de fondation et à une distance $-B$ au dessous de ce niveau.



Remarque :

La profondeur critique d'encastrement (D_c) est la profondeur à partir de laquelle la force portante à la rupture est constante. Nous avons retenu pour D_c les valeurs suivantes :

Sol	D_c/R	
	carrée	filante
I	4	6
II	10	12
III	16	18
IIIbis	20	22

$R = B/2$

. si $D > D_c$, on calcule k pour D_c/B au lieu de D/B

. Dans le cas d'une semelle rectangulaire :

$$k = k_0 + (k_1 - k_0) \cdot B/L$$

où k_0 est le facteur de portance pour une semelle carrée ($L/B=1$).

et k_1 est le facteur pour une semelle filante.

D- Essai au PENETROMETRE STATIQUE :

. Voir partie II chapitre 2

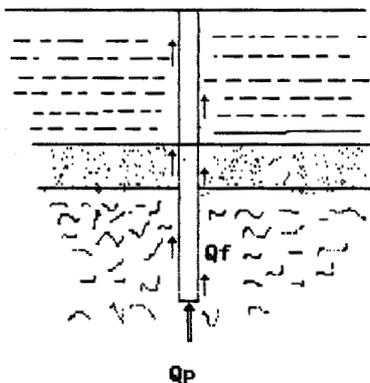
II- Fondations profondes

A- Méthodes classiques (C , Φ) :

La portance q_d est exprimée sous la forme $q_d = q_p + q_f$

où q_p représente le terme de pointe.
et q_f - - - de frottement.

L'effort limite s'écrit $Q_d = Q_p + Q_f$



Cas 1-

- . Le sol est homogène et naturel.
- . L'épaisseur de la couche est infinie.

$$q_p = a \cdot N_{qmax} + \lambda \cdot C \cdot N_{cmax} \quad \text{avec } a = 50 \text{ Kpa} \\ = 1.3 \text{ (pieu circulaire).}$$

$$q_p = 50 \cdot N_q + 1.3 \cdot C \cdot N_c$$

avec

$$N_{qmax} = e^{(7 \cdot \text{tg}(\Phi))}$$

$$N_{cmax} = (N_{qmax} - 1) / \text{tg}(\Phi)$$

$$\text{et } Q_p = q_p \cdot \pi \cdot B^2 / 4$$

Le frottement latéral s'écrit sous la forme :

$$Q_f = Q_{fc} + Q_{fp}$$

La méthode utilisée est celle de KERIZEL

$$Q_{fp} = 0.5 \cdot D \cdot f_p(\Phi) \cdot \pi \cdot B \cdot D$$

$$\text{avec } f_p(\Phi) = 0.062 e^{(6.672 \cdot \Phi)} \quad [3] \\ \Phi \text{ en radians.}$$

$$Q_{fc} = \pi \cdot B \cdot D \cdot C \cdot f_c(\Phi)$$

$$\text{avec } f_c(\Phi) = (1 + \sin \Phi') e^{[(\pi/2 + \Phi') \cdot \text{tg}(\Phi')]} \\ \text{et } \Phi' = (2/3) \cdot \Phi$$

Cas 2-

- . Le sol est homogène, purement cohérent.
- . L'épaisseur de la couche est infinie.

$$q_p = 7 \cdot \lambda \cdot C_{uu} \quad \text{avec } \lambda = 1.3$$
$$\text{et } Q_p = q_p \cdot \pi \cdot B^2 / 4$$

Théoriquement $Q_F = \pi \cdot B \cdot D \cdot C$ car $f_c(\Phi) = 1$, mais pour tenir compte de l'expulsion progressive de l'eau interstitielle, nous retenons l'expression due à Caquot et Kérisel :

$$Q_F = C_{uu} \cdot \frac{100 + C^2_{uu}}{100 + 7 \cdot C_{uu}}$$

Cas 3-

- . Le sol est homogène, Naturel.
- . Le sol est considéré comme un Bicouche.

Voir partie II chapitre 2.

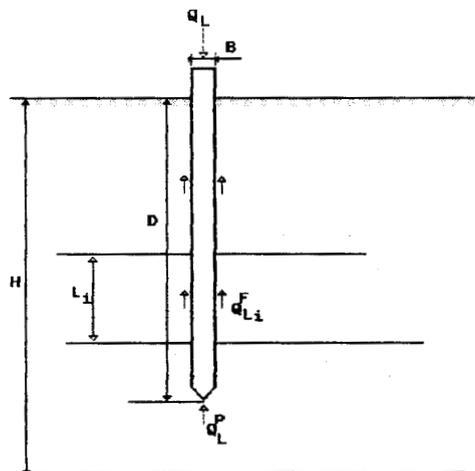
B- Essai au PRESSIOMETRE Menard :

Voir partie II chapitre 2.

C- Essai au PENETROMETRE STATIQUE :

La méthode adopté est due à BUSTAMANTE et GIANESELLI.

La charge limite Q_d s'écrit : $Q_d = Q_L^P + Q_L^F$



. Le terme de pointe $Q_L^P = q_{ca} \cdot k_c \cdot \pi \cdot B^2 / 4$

ou q_{ca} est la résistance de pointe équivalente au niveau de la pointe

k_c = facteur de portance pénétrométrique.

B = diamètre du pieu.

q : la résistance de pointe équivalente correspond à une moyenne arithmétique des résistances q mesurées sur une hauteur comprise entre 1.5 B au dessus de la pointe et -1.5 B au dessous de la pointe.

k_c : le facteur de portance est donné par le tableau suivant en fonction de la nature du sol et du groupe de pieu :

groupe I	groupe II
-----	-----
. pieux forés simples	pieux vissés moulés
. - - tubés	- métalliques battus
. - - à la boue	- battus moulés
. - - à la tranchée creuse	- en béton foncés
. Micropieux injectés sous faible pression	Micropieux injectés sous haute pression.
. Puits.	

Nature du sol	(10^3 Pa)	Facteur de portance k_c	
		Groupe I	Groupe II
Argile mole et vase	< 10	0,40	0,50
Argile moyennement compacte	10 à 50	0,35	0,45
Limon et sable lâche	≤ 50	0,40	0,50
Argile compacte à raide, Limon compact	> 50	0,45	0,55
Craie molle	≤ 50	0,20	0,30
Sable et grave moyennement compacts	50 à 120	0,40	0,50
Craie altérée à fragmentée	> 50	0,20	0,40
Sable et grave compacts à très compacts	> 120	0,30	0,40

Valeurs des facteurs de portance k_c pour le calcul de la résistance de pointe limite (ref [52])

Le terme de frottement latéral s'écrit :

$$Q_L^F = \sum_{i=1}^n Q_{L1}^F = \sum_{i=1}^n q_{s1} \pi \cdot B \cdot l_i \quad (\text{en kN})$$

où n = le nombre de couches traversées.
 l_i = épaisseur de la couche i
 et $q_{s,i}$ = frottement latéral unitaire au droit de la
 couche i (kN/m^2)

Le frottement latéral unitaire limite (q_s) est calculé en divisant la résistance de pointe q correspondant au niveau donné par un coefficient α , lequel permet de tenir compte de la nature du sol et des modes de confection des pieux.

$$q_s = q_c / \alpha$$

les valeurs de α sont données par le tableau suivant :

Nature du sol	q_c (10^3 Pa)	Coefficient α				Valeurs maximales de q_c (10^3 Pa)					
		I A	I B	II A	II B	I A	I B	II A	II B	III A	III B
Argile molle et vase	< 10	30	30	30	30	0,15	0,15	0,15	0,15	0,35	-
Argile moyennement compacte	10	40	80	40	80	(0,8)	(0,8)	(0,8)	0,35	0,8	$\geq 1,20$
	à 50					0,35	0,35	0,35			
Limon et sable lâche	≤ 50	60	150	60	120	0,35	0,35	0,35	0,35	0,8	-
Argile compacte à raide, Limon compact	> 50	60	120	60	120	(0,8)	(0,8)	(0,8)	0,35	0,8	$\geq 2,0$
						0,35	0,35	0,35			
Craie molle	≤ 50	100	120	100	120	0,35	0,35	0,35	0,35	0,8	-
Sable et grave moyennement compacts	50	100	200	100	200	(1,2)	(0,8)	(1,2)	0,8	1,20	$\geq 2,0$
	à 120					0,8	0,35	0,8			
Craie altérée à fragmentée	> 50	60	80	60	80	(1,5)	(1,2)	(1,5)	1,20	1,5	$\geq 2,0$
						1,2	0,8	1,2			
Sable et grave compacts à très compacts	> 120	150	300	150	200	(1,5)	(1,2)	(1,5)	1,20	1,5	$\geq 2,0$
						1,2	0,8	1,20			

Valeurs de α pour le calcul du frottement limite Q_1 (ref [52]).

III- Fondations semi-profondes

Les puits se distinguent des pieux par le fait :

- qu'ils sont creusés à la main (D.T.U. 13.2)
- que par suite leur section est minimale avec :
 - * un diamètre de 1.20 m. pour les puits circulaires
 - * une largeur mini de 0.80 et une section minimale de 1.1 m^2 pour les sections rectangulaires.
 - * qu'ils sont souvent moins profonds que les pieux.

$$5 < D/B < 10$$

- * qu'ils fonctionnent la plupart du temps en pointe c'est à dire par leur section de base.

D'une manière générale, les puits sont vérifiés à partir des formules des fondations profondes en considérant que le puit fait partie du groupe I de la classification proposée par le D.T.U. 13.2.

Dans le cas d'un puit rectangulaire, le calcul est fait à partir d'un rayon équivalent tel que :

$$R = \sqrt{\frac{B.L}{\pi}}$$

Dans un sol courant, on admet en général et par sécurité que le poids propre est équilibré par le frottement latéral et donc nous supposons que la portance est égale au terme de pointe [13].

Annexe 4 : Méthodes de calcul du tassement.

Nous développons dans cette annexe les méthodes retenues pour le calcul de tassement des fondations.

a- Méthode globale du module de réaction du sol :

voir paragraphe 2.4 (partie II).

b- Méthode Pressiométrique :

Cette méthode consiste à estimer le tassement du sol sous une semelle en additionnant le tassement du domaine sphérique à celui du domaine déviatorique (MENARD). Le calcul du tassement du domaine sphérique fait intervenir un coefficient α caractéristique liée à la structure du matériau, les valeurs de α sont proposées par Ménard [51].

Dans ces conditions le tassement de la semelle s'écrit :

Pour les sols homogènes :

$$w = \frac{1.33}{3.E} q \cdot R_0 \cdot \left(\lambda_2 \frac{R}{R_0} \right)^\alpha + \frac{\alpha}{4.5 E} q \cdot \lambda_3 \cdot R$$

où q = contrainte appliquée
nous prenons $\nu = 0.33$
 R_0 = rayon de référence = 30 cm.
 R = demie-largeur de la semelle = $B/2$
 λ_2, λ_3 = coefficients de forme de la semelle

L/B	1	2	3	5	20
λ_2	1.12	1.53	1.78	2.14	2.65
λ_3	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5

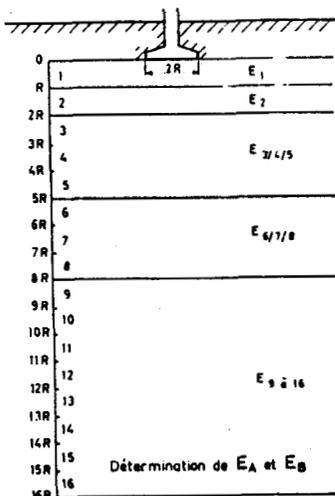
Pour les sols hétérogènes :

$$w = \frac{1.33}{3.E_B} q.R_o.\lambda_2 \left(\frac{R}{R_o}\right)^2 + \frac{\alpha}{4.5 E_A} q.\lambda_3.R$$

avec $E_A = E_1$

$$E_A = \frac{4}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{0.85 E_2} + \frac{1}{E_{3/4/5}} + \frac{1}{2.5 E_{6/7/8}} + \frac{1}{2.5 E_{9\&16}}}$$

Cette méthode nécessite le découpage du sol sous la semelle en tranches d'épaisseur B/2 et suppose que les variations du module pressiométrique avec la profondeur ne soient pas trop importantes.



En pratique, si $E_{9\&16}$ n'est pas connu, nous prenons :

$$E_B = \frac{3.6}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{0.85 E_2} + \frac{1}{E_{3/4/5}} + \frac{1}{2.5 E_{6/7/8}}}$$

et si en plus, $E_{6/7/8}$ n'est pas connu non plus : on prend

$$E_B = \frac{3.2}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{0.85 E_2} + \frac{1}{E_{3/4/5}}}$$

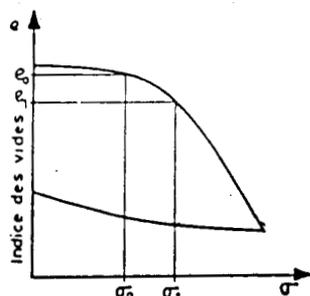
c- Méthode d'intégration par tranches :

Cette méthode consiste à découper le sol sous la semelle en tranches horizontales depuis la cote 0 (base de la semelle) jusqu'à une profondeur tel que l'accroissement des contraintes négligeable. On suppose que la semelle est souple et on calcule le tassement dans l'axe de la semelle.

On calcule dans un premier temps la répartition des contraintes en profondeur sous l'action $(q - \gamma.D)$. Le sol est ensuite divisé en couches horizontales. Le tassement de chaque couche est alors calculé compte tenu des contraintes qui y règnent et des résultats de l'essai oedométrique.

Pour une couche d'épaisseur H_1 , si la contrainte est passée de σ_0 à σ_1 , le tassement de cette tranche noté W_1 est égale :

$$W_1 = H_1 \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$



La variation de l'indice des vides $e = e_0 - e_1$ sera lue sur la courbe oedométrique connaissant la variation de la contrainte

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_0$$

Le tassement total sera :

$$W = \sum_1^n W_1$$

Nous avons adopté un découpage du sol en tranches de 25 cm chacune.

Remarque :

1- Pour rester homogène avec l'hypothèse d'une semelle rigide, nous considérons que le tassement au centre d'une semelle souple est égale à 80% du tassement en supposant la semelle rigide, approximation admise par un grand nombre d'auteurs.

2- Cette méthode appliquée pour les sols homogènes peut être utilisée dans le cas des sols à faible hétérogénéité à condition qu'un essai oedométrique soit réalisé dans chaque tranche du sol qu'elle même peut être considérée comme homogène.

Contraintes en profondeur sous la fondation :

La solution de la distribution des contraintes dans un massif semi-infini sous l'action d'une force concentrée été étudiée par Boussinesq.

$$\sigma = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot z^3} \cos(\theta)$$

Les différents cas de chargement peuvent être déduits de cette formule.

* Plaque rectangulaire souple

La fondation est supposée rectangulaire; la charge exercée se traduit par une distribution linéaire de contrainte. Le sol est supposé homogène, la contrainte sous la fondation à une profondeur z est proposée par Giroud [54] sous la forme suivante:

$$\sigma = 4 \cdot q \cdot O_z \quad \text{où} \quad q = P/(B \cdot L)$$

$$O_z = A_z + B_z + C_z \quad \text{avec} \quad \alpha = L/B$$

$$A_z = \frac{\alpha \beta}{2\pi} \times \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} - \frac{\beta^2}{(1 + \beta^2) \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2}}$$

$$B_z = \frac{\beta}{2\pi} \times \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} - \frac{\beta^2}{(\alpha^2 + \beta^2) \cdot \sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2}}$$

$$C_z = \frac{1}{2\pi} \times \text{Arctg} \frac{\alpha}{\beta \sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2}} + \frac{\alpha \beta}{\sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2}} - \frac{\alpha \beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} + \frac{\beta}{\alpha \sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2}} - \frac{\beta}{\alpha \sqrt{1 + \beta^2}}$$

Cette formule permet d'avoir la distribution des contraintes à la verticale du centre de la fondation ($\beta = Z/(B/2)$) ainsi que celle au coin de la fondation ($\beta = Z/B$). Dans la pratique, cette formule permet de couvrir la plupart des fondations courantes: fondation allant du carré à la semelle infinie. Nous présentons dans le tableau suivant les valeurs du coefficient d'amortissement O_z à l'aplomb du centre de la plaque:

L/B \ Z/B	1.0	1.25	1.5	2.0	5.0	10.0
0.25	0.930	0.945	0.951	0.956	0.959	0.959
0.50	0.701	0.748	0.775	0.800	0.818	0.818
0.75	0.484	0.541	0.580	0.624	0.666	0.668
1.00	0.336	0.388	0.428	0.481	0.545	0.549
1.25	0.241	0.284	0.320	0.373	0.454	0.461
1.50	0.179	0.214	0.245	0.293	0.384	0.395
1.75	0.137	0.166	0.192	0.234	0.329	0.344
2.50	0.072	0.088	0.103	0.131	0.219	0.244
3.00	0.051	0.063	0.074	0.095	0.172	0.202
3.50	0.038	0.047	0.055	0.072	0.139	0.171
4.00	0.029	0.036	0.043	0.056	0.113	0.147
4.50	0.023	0.029	0.034	0.045	0.094	0.128
5.00	0.019	0.023	0.028	0.037	0.079	0.112
6.00	0.013	0.016	0.020	0.026	0.058	0.088
7.00	0.010	0.012	0.014	0.019	0.044	0.070
8.00	0.007	0.009	0.011	0.015	0.034	0.057
9.00	0.006	0.007	0.009	0.012	0.028	0.047
10.00	0.005	0.006	0.007	0.009	0.023	0.040
11.00	0.004	0.005	0.006	0.008	0.019	0.034
20.00	0.001	0.001	0.002	0.002	0.006	0.011

Remarque :

1- Pour rester homogène avec l'hypothèse d'une semelle rigide, nous considérons que le tassement au centre d'une semelle souple est égale à 80% du tassement en supposant la semelle rigide, approximation admise par un grand nombre d'auteurs.

2- Cette méthode appliquée pour les sols homogènes peut être utilisée dans le cas des sols à faible hétérogénéité à condition qu'un essai oedométrique soit réalisé dans chaque tranche du sol qu'elle même peut être considérée comme homogène.

BIBLIOGRAPHIE

B I B L I O G R A P H I E

- [1] DUFU J. : X2A : Un système d'évaluation technique et
MANGIN J.C et économique de bâtiments. Communications
LEININGER J.P des journées d'études des 17 et 18 décembre
GUENA F. 1986. Plan CONSTRUCTION.
MIRAMOND M.
- [2] BAYON R. : L'établissement d'un projet de bâtiment,
tome 3 - EYROLLES - 1987.
- [3] BOISSIER D. : Contribution à la prise en compte des
interactions "sols-fondations-bâti" dans
la conception des bâtiments. Approche
probabiliste de la sécurité.
Thèse de Docteur ès Sciences: INSA Lyon 1982
- [4] CAVALINI C. : Guide pratique de la construction.
RAFFESTIN Y. Editions du moniteur 1977.
- [5] QUINTRAND P. : La C.A.O en architecture .
Edition Hermes 1985.
- [6] MIRAMOND M. : Méthodologie de conception de bâtiment. Un
système assisté par ordinateur :évaluation
technique et économique d'avant projet.
Thèse de Docteur ès Sciences: INSA Lyon 1981
- [7] GALLEY H. : Un modèle d'évaluation détaillé de
structure de bâtiments intégré dans le
système de C.A.O X2A, utilisant un système
de gestion de bases de données réseau.
Thèse de 3ème cycle: INSA Lyon, 1987.
- [8] DUFU J. : Conception assistée par ordinateur : contri-
bution à l'évaluation technique et économ-
ique de structure et second-oeuvre d'avant
projets de bâtiments.
Thèse de Docteur ès Sciences: INSA Lyon 1981
- [9] BOISSIER D. : Technical and economic evaluations with
DUFU J. micro-computer for the preliminary building
MIRAMOND M. design stage.
ENGSOFT II, Mars 1981. pp. 879-889.

- [10] DUFAU J : Etude et réalisation du système de C.A.O bâtiment X2A.
Cours photocopié de l'Université de Savoie.
- [11] BEZZAZI M . : Un modèle conceptuel pour l'environnement technique et réglementaire du bâtiment : intégration dans un système à base de connaissances.
Travail de recherche en cours, L.M.H Béthune.
- [12] DERAMPE P. : La résolution des problèmes de fondations.
Tome II - Edition du moniteur des T.P- 1969.
- [13] PUTATTI J. : Technologie de la construction des bâtiments Fondations-Soutènement.
Editions Eyrolles, 1979.
- [14] BOISSIER D. : CESSOL : An expert système for the
MANGIN J.C specification of site investigation.
MOUGIN J.P International Conference on Computer in
Architecture, 1983.
- [15] HABEJ-BEK T. : Intégration de la composante "adaptation au au sol" dans X2A. Travail de recherche en cours. L.G.C.H Chambéry.
- [16] OLIVARI G. : Cours de Mécanique des sols. Tome : 2 Fondations superficielles et profondes, Stabilité des pentes. Ecole Centrale de Lyon
- [17] PHILIPPONNAT G. : Fondations et ouvrages en terre.
Editions Eyrolles 1987.
- [18] D.T.U 13.12 : Règles pour le calcul des Fondations superficielles. C.S.T.B 1988.
- [19] D.T.U 13.1 : Travaux de fondations superficielles.
C.S.T.B 1978.
- [20] D.T.U 13.2 : Fondations profondes.
C.S.T.B 1983.
- [21] BORGES F. : Implementation of design rules at level II
CASTANHETA L.N.E.C, janvier 1974.
- [22] CORNELL C.A : Design parameters-Structures. International Conference on applications of Statistics and Probability in soil and structural Engineering (ICASP). Aix-la-Chapelle, 1975.
TOME III (pp. 139-153)
- [23] A.H.S ANG. : Critical analysis of reliability, principle
ELLINGWOOD B.R relative to design. ICASP, Hong-Kong 1971,
(pp 1-15).

- [24] GUENA F. : Vers un langage pour développer des systèmes de C.A.O de nouvelle génération pour le bâtiment. Intelligence artificielle et C.A.O en B.T.P. Recherches et applications. CIMA, pp 25-38. Editions Hermes, 1988.
- [25] LEININGER J.P: METACAD:Un générateur d'applications orienté objet , exemple d'utilisation dans le domaine du bâtiment. EUROPIA 88, CIMA, pp 361-374. Editions Hermes 1988.
- [26] FERRIES B. : Recherche du schéma conceptuel d'une
MEILHAT V. base de données devant constituer le
COUILLET A. coeur d'un système de C.A.O orienté
PELEGRIN F. architecture : une approche SGBD sémantique
C.A.O et Robotique en Architecture et
B.T.P, pp 281-289, MARSEILLE 1986.
Editions Hermes
- [27] DUFAU J. : Intégration d'un modèle d'évaluation techni-
GALLEY H. que et économique de gros-oeuvre de bâtiment
MANGIN J.C. dans un système de C.A.O utilisant un
système de gestion de base de données
réseau.
C.A.O et Robotique en Architecture et
B.T.P, pp 270-280, MARSEILLE 1986.
Editions Hermes.
- [28] C.S.T.B. : Méthode de structuration des données sur
les ouvrages de bâtiment.
C.A.O et bâtiment, état et perspectives.
Plan construction, journées d'études 86.
pp 19-29.
- [29] AUTRAN J. : SGBD avancés et C.A.O en architecture : une
FLORENZANO M. application à la description d'un projet
LE MAITRE J. de bâtiment.
C.A.O et Robotique en Architecture et
B.T.P, pp 238-255, MARSEILLE 1986.
Editions Hermes
- [30] LEDIZES J.M. : L'apport des SE pour l'aide à la conception
Intelligence artificielle et C.A.O en
B.T.P. Recherches et applications, CIMA,
pp 63-77.
Editions Hermes, 1988.
- [31] ZREIK K. : L'IA dans le secteur B.T.P : état de l'art.
KAS-HANNA K. Intelligence artificielle et C.A.O en
B.T.P. Recherches et applications, CIMA,
pp 11-24.
Editions Hermes, 1988.
- [32] S.E.L. : Système d'évaluation des logements.
Commission de recherche pour la construction
de logements. Office fédéral du logement.
SUISSE 1975.

- [33] SAUCE G. : Aide à la conception d'esquisse de bâtiment par la manipulation de critères de qualité. Thèse de 3ème cycle : INSA Lyon, 1984.
- [34] MONGOLFIER J. : Approche multicritère des problèmes de décision.
BERTIER P. Editions Hommes et Techniques, 1978.
- [35] MOULIN H. : La convexité dans les mathématiques de la décision. Hermann Paris.
FOGELMAN F. Collection Méthodes.
SOULIE
- [36] COHON J.L : Multiobjective programming and planning. Academic Press. New-York, 1978.
- [37] GERO J.S : What if ? Exploring the consequences of design and performance decisions in computer aided design.
RADFORD A.D CAD 82 - Butterworth and Co Ltd. 1982,
MURTHY N.S pp. 633-646.
- [38] BARRAUD S. : Eléments pour une planification multicritère des équipements d'assainissement pluvial. Thèse de doctorat : INSA Lyon, 1986.
- [39] ROY B. : ELECTRE III : algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences.
- [40] MACGILCHRIST R. : Traitement de l'incertitude pour un problème de diagnostic. Intelligence artificielle et C.A.O en B.T.P Recherche et applications, CIMA, pp 123-140 Editions Hermes, 1988.
- [41] DUBOIS D. : Théorie des possibilités; Applications à la représentation des connaissances en informatique.
PRADE H Editions Masson, 1985.
- [42] ... : Micro-systèmes : Mai 1986 p.93-103.
- [43] BELLMAN R.E : Decision-making in a fuzzy environment;
ZADEH L.A Management Science 17, 1970,
pp. 141-164.
- [44] BOULEMIA J. : Modélisation stochastique du sol en vue de la conception de l'infrastructure des bâtiments. Travail de recherche en cours. L.M.H Béthune.
- [45] AL-HAJJAR J. : Un modèle interactif d'évaluation technique des fondations superficielles en phase d'avant projet du bâtiment. Journées de l'A.U.G.C , Lille 1988.

- [46] CORDARY D. : Choix de la profondeur de reconnaissance pour les fondations superficielles.
GIROUD J.P. Revue française de géotechnique n=7 - 1979.
OBIN J.P.
- [47] SANGLERAT G. : Cours pratique de mécanique des sols-tome 2-
COSTET J. Editions DUNOD, 1982.
- [48] FUENTES A. : Calcul pratique des ossatures de bâtiments en béton armé.
Editions Eyrolles, 1981.
- [49] HABIB P. : Précis de géotechnique.
Dunod 1973.
- [50] GIROUD J.P. : Table pour le calcul des fondations.
TRAN VO NHIEM Tome 3. Dunod.
OBIN J.P.
- [51] MENARD L : Le pressiomètre MENARD.
Notice générale. D-60.
- [52] BUSTAMANTE M. : Bulletin de liaison L.P.C.
GIANESELLI L. Sept,oct 1983 réf : 2842.
- [53] Fond 72 : Fondations courantes d'ouvrages d'Art.
LPC-SETRA.
- [54] GIROUD J.P. : Table pour le calcul des fondations.
Tassement, Tome 2. Dunod, 1973.
- [55] ... : BATIPRIX 1987.
Publications du Moniteur.
- [56] VENVIEN J. : Dalles, poutres, poteaux, semelles. Table pour le calcul rapide.
Editions Dunod, 1977.
- [57] LECOVEC J. : Momento d'emploi du B.A.E.L 80 et règlement annexes. pp 358-396.
Techniques et documentation-Lavoisier, 1983.
- [58] ALBIGES M. : Théorie et pratique du béton armé aux états limites.
MINGASSON M. Editions Eyrolles.
- [59] A.F.R.E.M. : Méthodes stochastiques pour l'étude des matériaux et des structures.
Association française de recherche et d'étude des matériaux.
Rapport : décembre 1985.
- [60] MUNRO J. : The safety of structures in the face of uncertainty and imprecision.
BROWN B. ICASP, Italy 1983.

- [61] SHIRAISHI N. : Structural design process as Fuzzy decision
FURUTA H. model.
ICASP, Italy 1983.
- [62] BLOKLEY D.I : Structural safety as inferred from a fuzzy
PILSWORTH B.W relational knowledge base.
BALDWIN J.F . ICASP- Italie 1983.

