



**HAL**  
open science

# Optimisation par ensembles flous de la campagne de caractérisation géotechnique.

Djamalddine Boumezerane

► **To cite this version:**

Djamalddine Boumezerane. Optimisation par ensembles flous de la campagne de caractérisation géotechnique.. Génie civil. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2012. Français. NNT: . tel-00811475

**HAL Id: tel-00811475**

**<https://theses.hal.science/tel-00811475v1>**

Submitted on 10 Apr 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique  
Département de Génie civil  
Laboratoire Construction et Environnement



## Thèse de Doctorat en Génie civil

Présentée par :

Mr **BOUMEZERANE Djamalddine**

Magister en Génie civil de l'ENP

# Optimisation par ensembles flous de la campagne de caractérisation géotechnique

Soutenue publiquement le **17/05/2012** devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	<b>BALI Abderrahim</b>	Professeur	<b>E.N.P</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>BELKACEMI Smaïn</b>	Professeur	<b>E.N.P</b>
<b>Examineurs :</b>	<b>OBERGUGGENBERGER Michael</b>	Professeur	<b>Univ. Innsbruck Autriche</b>
	<b>BAHAR Remdane</b>	Professeur	<b>U.S.T.H.B</b>
	<b>MELBOUCI Bachir</b>	Professeur	<b>U.M.M.Tizi-Ouzou</b>
	<b>OMRACI Kamel</b>	Maître de Conf. A	<b>E.N.P</b>
<b>Invité :</b>	<b>ZLENDER Bojan</b>	Professeur	<b>Univ. Maribor Slovénie</b>

**ENP 2012**

## **DEDICACES**

A mes parents,

A ma tante,

A toute la famille, notamment mes neveux

Sofiane et Hakim

## REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche n'aurait pu voir le jour sans le concours d'un certain nombre de personnes. Pour l'entamer, aura-t-il fallu avoir des discussions assez poussées avec le Professeur Belkacemi pour en comprendre le but recherché ; Je le remercie profondément de m'avoir inculqué ce qu'il y a de passionnant en géotechnique. Il n'a pas été facile de cibler un sujet précis, tant le domaine reste vaste. On apprend finalement que nous sommes sûrs que rien n'est certain lorsqu'il s'agit d'étudier le sol.

Mes remerciements vont aux professeurs Zlender Bojan et Trauner Ludvik de m'avoir accueilli au sein de l'institut de Géotechnique de l'Université de Maribor – Slovénie ; ce fut une expérience très enrichissante et c'est grâce à eux que j'ai eu l'occasion de rencontrer des professionnels tel le professeur Stephan Semprich chef de département géotechnique et calcul de fondations à l'université technique de Graz en Autriche, et qui m'a donné l'occasion de présenter une partie de cette recherche lors de séminaires.

Je tiens à remercier le professeur Michael Oberguggenberger qui m'a marqué par sa simplicité et sa disponibilité. Auprès de son équipe de l'université de Innsbruck (Autriche) j'ai appris beaucoup de choses, notamment en méthodes mathématiques d'analyse des incertitudes ; les remarques et suggestions pertinentes du professeur m'ont été d'un apport considérable.

Je ne remerciais pas assez les membres du Jury d'avoir accepté de prendre part à l'examen de ce travail de recherche, les professeurs Bahar Remdane, Melbouci Bachir et Dr Omraci Kamel. Je remercie le professeur Bali Abderrahim d'avoir accepté de présider le Jury, pour ses encouragements continuels et sa disponibilité au sein de notre laboratoire « Construction et Environnement ».

Je remercie Dr Seghir Abdelghani pour ses encouragements et pour les remarques qu'il a faites durant les lectures qu'il m'a accordées au moment de la rédaction de l'article à publier.

Je remercie tous mes amis(es) de tout cœur, qui se reconnaîtront ici sans les citer. Merci aux amis(es) de l'université de Béjaïa et de l'Ecole Polytechnique, je ne pourrais les citer tous, ils se reconnaîtront également.

## ملخص

موضوع هذا البحث هو تحسين كثافة المسح من خلال إدراج المعلومات النوعية في توصيف الموقع جيوتقنيا. في الواقع ، نقص المعلومات وعدم وضوحها يشكل كمية عدد المسوح لتحديد خصائص الموقع لا تستجيب لقواعد محددة جيدا. المشكلة الأساسية للمهندس الجيوتقني، وخصوصا عندما يفقد التحقيق في موقع ما. المعيار الأوروبي Eurocode 7 ينص على الحد الأدنى من المسوح اعتمادا فقط على السطح من موقع الدراسة. النهج الذي ينبغي أن تضطلع المهندس وجها لوجه مع المشكلة أكبر من ذلك بكثير لأنه مرتبط بالحكم الهندسي. معلومات مختلفة تؤثر على هذا القرار ، بما في ذلك جيولوجيا الموقع ، التباين المكاني لظروف التربة ، نوع المشروع والمواقع المجاورة ، وأكثر من ذلك. المجموعات الغامضة هي أداة مناسبة لمثل هذه المشاكل ، فهي تسمح للنظر في نوعية ومحكمة المهندس وقد تم تطوير نظام استدلال غامض مع الأخذ في الاعتبار المعايير المختلفة التي يمكن أن تؤثر على عدد نقاط الاعتراف في الموقع. شيدت المجموعات. وأظهرت التطبيقات المقدمة على المواقع الفعلية فعالية على أساس استبيانات وأحكام الخبراء والتي تستند إلى المعلومات المتاحة في الوثائق التقنية الغامضة وملاءمة هذا النهج. بسيط ومنطقي في بنائه ، ويمكن استخدامه بشكل منتظم. ينبغي فقط جلب العديد من معلومات الإدخال بكفاية . الأخذ في الاعتبار عدم اليقين ويتم الحصول على النتائج على النحو المدرج . في نظام إدخال البيانات يتم من خلال استخدام نطاقات من القيم ، و ذلك باستعمال طريقة محاكاة مونت كارلو. وتعطى فهم أوضح للحالة. تم إجراء معايرة النتائج باستخدام الحد الأدنى لعدد المسوحات التي أوصت بها Eurocode 7. استخدام المجموعات العشوائية هو نهج آخر نقترحه في هذا البحث. ويستند هذا التوجه على مبدأ الاحتمالات الذاتية (درجة الاعتقاد) التي يستعملها الخبراء المعاونين مع نطاقات من القيم لعدد من الاستطلاعات. بعد ذلك يتم بناء خانات الاحتمالات العلوية والسفلية لتوجيه المهندس على كثافة نقاط التحقيق الذي تنفيذه في الموقع.

**الكلمات الدالة :** تحقيق جيوتقني , كثافة مسوحات , مجموعات غامضة , نظام استدلال , شكوك

## RESUME

Le sujet de cette recherche est l'optimisation de la densité de sondages par la prise en compte de l'information qualitative dans la caractérisation géotechnique de site. En effet le manque d'information et le caractère vague de celle-ci constitue un problème fondamental pour les ingénieurs géotechniciens, notamment lorsqu'il s'agit de conduire une investigation géotechnique. La quantification du nombre de sondages pour la caractérisation de site ne répond pas à des règles bien définies. L'Eurocode 7 mentionne un minimum de sondages ne dépendant que de la surface du site d'étude. La démarche que l'Ingénieur devrait entreprendre vis-à-vis de ce problème est beaucoup plus liée au jugement. Différents paramètres influencent ce jugement, notamment la géologie du site, la variabilité spatiale des conditions de sol, le type de projet ainsi que les sites avoisinants entre autres. Les ensembles flous sont outil adéquat pour ce genre de problèmes, ils permettent de prendre en considération l'aspect qualitatif et le jugement de l'ingénieur. Un système d'inférence flou a été mis en place en prenant en considération les différents paramètres qui peuvent influencer le nombre de points de reconnaissance sur site. Les ensembles flous ont été construits sur la base de questionnaires et de jugement d'experts ainsi qu'en se basant sur l'information disponible dans la littérature technique. Les applications effectuées sur des sites réels ont montré l'efficacité et la pertinence de la démarche adoptée. Simple et logique dans sa construction, elle peut être utilisée de manière systématique. Il suffit de bien introduire les paramètres d'entrée. La prise en compte des incertitudes liées à l'introduction des données dans le système se fait par l'utilisation d'intervalles de valeurs, simulées par la méthode MonteCarlo. Des résultats sous formes d'histogrammes sont obtenus et permettent de mieux apprécier la situation. Le calage des résultats a été fait en utilisant les minimums du nombre de sondages recommandés par l'Eurocode7. L'utilisation des ensembles aléatoires est une autre approche que nous proposons dans ce travail de recherche. Cette approche repose sur le principe des probabilités subjectives (degré de croyance) que les experts associent à des plages de valeurs du nombre de sondages. La construction de boîtes de probabilités supérieure et inférieure donne une orientation à l'ingénieur sur la densité de points de reconnaissance à effectuer sur site.

**Mots-clés :** Investigation géotechnique, Densité de sondages, Ensembles flous, Système d'inférence, Incertitudes.

## ABSTRACT

The subject of this research is to optimize the density of surveys by taking into account qualitative information in the geotechnical characterization of site. Indeed, the lack of information and the vagueness constitute a fundamental problem for geotechnical engineers, especially when driving a geotechnical investigation. Quantification of the number of surveys for site characterization does not respond to precise and defined rules. Eurocode 7 states a minimum of surveys depending only on the surface of the study site. The approach that the engineer should undertake toward the problem is much more linked to judgment. Various parameters influence this decision, including the site's geology, the spatial variability of soil conditions, type of project and the neighboring sites and more. The fuzzy sets are suitable tool for such problems; they allow considering the qualitative information and engineer's judgment. A fuzzy inference system was developed taking into account the various parameters that can influence the number of investigation points on site. Fuzzy sets were constructed on the basis of questionnaires and expert judgments and based on information available in the literature. Applications made on real sites have shown the effectiveness and appropriateness of the approach. Simple and logical in its construction, it can be used systematically. We just need to introduce adequate input parameters. Taking into account the uncertainties in the data entry system is done by the use of ranges of values, simulated by the Monte Carlo method. The results are obtained as histogram and a clearer understanding of the situation is given. The calibration of the results was done using the minimum number of surveys recommended by the Eurocode7. The use of random sets is another approach that we propose in this research. This approach is based on the principle of subjective probabilities (degrees of belief) that experts associate with ranges of values of the number of surveys. The construction of boxes of upper and lower probabilities provides guidance to the engineer on the density of investigation points to be performed on site.

**Keywords:** Geotechnical investigation, Soundings density, Fuzzy sets, Inference system, Uncertainties

## AGZUL

Anadi-a nga-t yef usselhu n tnezzī deg wayen yerzan assenqed n wakal. Asselhu-a, yef leḥsab-nney, yessefk ad yili s tukci n wazal i tγara n telya (neγ isalan) ay d-njemmeε seg ṡṡifat n wakal n wemkan ay nessenqed. Deg tidet, lexṡaṡ n telya neγ lexṡaṡ n udeqqeq deg telya d yiwen seg wuguren imeqranen ay sEan yijenyuṛen n wakal, ladya deg yinadiyen-nsen deg wenrar. Assugget (neγ aṡtuqqet) n ussenqed n wakal ur yesEi ara ilugan (neγ leqwanin) ay ibanen.

Eurocode 7 yebder-d kan amḍan amecṡuḥ n yissenqed n wakal, yerna issenqed-nni rzan kan aḥric n ufella n wakal n wemkan-nni ay ttnadin yijenyuṛen ad t-sneqden. S waya, mi ara d-yemlil ujenyuṛ ugur am wa, yezmer kan ad yettkel yef rṛay-nnes akken ad t-yefru, yerna aya yewEeṛ. Aṡas n tγawsiwin ay yessefk ujenyuṛ n wakal ad tent-id-iger deg leḥsab i wakken ad yeddem rṛay iṡeḥḥan, gar-asant tussnakalt n wemkan-nni n ussenqed, amgerrad yellan deg wakal nni n wemkan-nni seg tenqidt yer tayed, ṡṡenf n usenfar ara yettwagen deg wakal-nni akked ṡṡenf n wakal ay yellan deg yimukan ay d-yezzi i wemkan-nni ed waṡas n tγawsiwin niḍen. Tigrummiwin tiruganin (ensembles flous) d ttawil iwutan i ferru n ṡṡenf-a n wuguren, imi ay ttajant ajenyuṛ n wakal ad yefk azal i tγara yerna ad yefru ugur s rṛay-nnes netta. Assenqed arugan d yiwen n ttawil n unadi ay d-yeggaren deg leḥsab tγawsiwin ay yemgerraden ay izemren ad urarent dduṛ deg wemḍan n tenqidin n ussenqed deg wemkan anda nebya ad neg anadi. Tigrummiwin tiruganin ttuheyyant s yisseqsiyen akked leṛyuy ay ttaddamen yimazzayen, am wakken ay d-ggarent deg leḥsab tilya (isalan) ay yellan deg yedlisen itekniyen. Tikli-a tettwaḍfer deg yimukan yerna tban-d tenfeE yerna nezmer ad nettkel fell-as. Tikli-a d tafessast ed d tuṡwibt, yerna tezmer ad tettusseqdec deg yakk imukan. Yessefk kan yef ujenyuṛ ad yessekcem leḥsabat iṡeḥḥan akken ad tt-yesseqdec. Tγawsiwin ay yef ur yetḥeqq ujenyuṛ yessefk fell-as ad tent-idiger deg leḥsab. I Imend n waya, yessefk ad yesseqdec azigen n wazalen (intervalles de valeurs) s usseqdec n tarrayt n Monte Carlo. Igmaḍ ad d-ffyen deg yistugṛamen (histogrammes) yerna ad jjen ajenyuṛ ad iqeyyem tagnit s webrid igerrzen ugar. Asserked n yegmaḍ d win ara yeg ujenyuṛ s usseqdec n wemḍan amecṡuḥ n yissenqed s uqader n lewṡayat n Eurocode7. Asseqdec n tegrummywin tigacuranin (ensembles aléatoires) d abrid niḍen ay d-nessumer deg leqdic-a n unadi. Abrid-a d win yettqadaren lqanun n tseqqarin tisentalin (probabilités subjectives) (neγ tiṡeddarin n laman). Tiseqqarin-a tteqqnen-tent yimazzayen yer yinurar n wazalen yeqqnen yer wemḍan n yissenqed. Lebni n tsendyaq n tseqqarin (timinegt akked tmazdart) d ayen ara yejjen ajenyuṛ ad iṡer sanda ay twehha tnezzī n tenqidin n ussenqed ara yettwagen deg wemkan n unadi.

**Tisura** : Anadi ajyutiqni, amḍan n yisenqed, tigrummywin tiruganin, anagrah n weskan, tarussna

## **SOMMAIRE**

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 - <i>INCERTITUDES ET QUELQUES ASPECTS DE L'INVESTIGATION GEOTECHNIQUE</i></b>	
INTRODUCTION	4
1.1 LES CATEGORIES D'INCERTITUDES EN GEOTECHNIQUE	6
1.2 HISTORIQUE RESUME SUR L'INVESTIGATION GEOTECHNIQUE	8
1.3 CARACTERISATION DE SITE	10
1.4 EXPLORATION ET INVESTIGATION	11
1.4.1 Modèles de caractérisation de site	12
1.5 LE PROCESSUS D'INVESTIGATION	13
1.6 LES SONDAGES	16
1.6.1 Fréquence et profondeur des sondages	16
1.6.2 Recommandations sur les profondeurs minimales des sondages	17
1.6.3 Lignes directrices sur le plan (schéma) des sondages	19
CONCLUSION	22
<b>Chapitre 2     <i>ETUDES BIBLIOGRAPHIQUE DE QUELQUES ASPECTS DES INCERTITUDES EN GEOTECHNIQUE</i></b>	
INTRODUCTION	24
2.1 DESCRIPTION DU PROBLEME	25

2.2 REVUE SUR LA LITERATURE TECHNIQUE	27
2.2.2 Utilisation des ensembles flous	37
2.2.3 Utilisation des réseaux neuronaux flous	43
CONCLUSION	44
<b>Chapitre 3</b> <i>FORMULATION DES PARAMETRES INFLUENCANT UNE INVESTIGATION GEOTECHNIQUE, UTILISATION DES ENSEMBLES FLOUS</i>	
INTRODUCTION	46
3.1 TRAITEMENT DES INCERTITUDES	47
3.2 PARAMETRES INFLUENCANT UNE INVESTIGATION GEOTECHNIQUE	47
3.3 DISPOSITION DES SONDAGES	54
3.4 INTRODUCTION AUX ENSEMBLES FLOUS ET AU RAISONNEMENT FLOU	57
3.5 CONSTRUCTION DES ENSEMBLES FLOUS POUR INVESTIGATION	
GEOTECHNIQUE	64
3.6 CLASSIFICATION DES PARAMETRES D'ENTRÉE	65
CONCLUSION	75
<b>Chapitre 4</b> <i>CONSTRUCTION D'UN SYSTEME D'INFERENCE FLOU ET APPLICATION EN INVESTIGATION GEOTECHNIQUE</i>	
INTRODUCTION	77
4.1 INFERENCE FLOUE	78
4.2 OPERATIONS SUR LES ENSEMBLES FLOUS	79

4.3 SYSTEME D'INFERENCE FLOU	82
4.4 APPLICATION EN INVESTIGATION GEOTECHNIQUE	85
4.5 FONCTIONNEMENT DU SYSTEME D'INFERENCE FLOU	94
4.6 TRANSFORMATION DE LA DENSITE G EN UN NOMBRE DE SONDAGES	96
4.6.1 APPROCHE I	96
4.6.1.2 Application	99
4.6.2 APPROCHE II	110
4.6.2.2 Applications	113
CONCLUSION	116
 <b>Chapitre 5</b> <i>ANALYSE DE LA DECISION EN FONCTION DES PARAMETRES D'ENTRÉE DU SYSTEME D'INFERENCE FLOU</i>	
INTRODUCTION	119
INFLUENCE DES PARAMETRES D'ENTRÉE SUR LA DENSITE	119
5.1 INFLUENCE DES PARAMETRES D'ENTREE SEPAREMENT	120
5.2 INFLUENCE DE DEUX PARAMETRES SUR LA DECISION	124
5.3 INFLUENCE DE TROIS PARAMETRES SUR LA DECISION	135
5.4 PRISE EN COMPTE DE QUATRE PARAMETERS D'ENTREE	143
5.5 INFLUENCE DE L'ENSEMBLE DES PARAMETRES D'ENTREE SUR LA DENSITE	144
CONCLUSION	148

**Chapitre 6** *UTILISATION DES PROBABILITES COMME OUTIL D'AIDE DANS LE SYSTEME D'INFERENCE FLOU*

INTRODUCTION	150
6.1 ANALYSE DES RESULTATS	151
6.2 ENSEMBLES FLOUS D'ENTREE COMME VECTEURS	152
6.3 ANALYSE PAR INTERVALLES (PLAGES) D'ENTREE	157
6.4 ETUDE DE CAS	158
6.5 LES RESULTATS DEPENDENT DES INTERVALLES D'ENTREE	163
CONCLUSION	165

**Chapitre 7** *UTILISATION DES ENSEMBLES ALEATOIRES POUR L'ESTIMATION DE LA DENSITE DE SONDAGES EN INVESTIGATION GEOTECHNIQUE*

INTRODUCTION	167
7.1 INCERTITUDES ET ENSEMBLES ALEATOIRES	168
7.2 PROBABILITES IMPRECISES	170
7.3 SITUATION DU PROBLEME	171
7.4 UTILISATION DU PARAMETRE VARIABILITE DU SOL	173
7.5 CONSTRUCTION DE LA FONCTION OBJECTIVE	174
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	178
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>180</b>

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Dans leurs tentatives de connaître le sol, les ingénieurs géotechniciens ont toujours été confrontés à l'incertain et au manque d'information pour prendre des décisions. Même si l'on arrive à effectuer suffisamment d'essais au laboratoire et sur site pour un projet donné, il restera toujours une part importante d'inconnu. Dans ce genre de situation on ignore moins de choses que si aucun essai n'a été effectué.

La démarche à suivre pour planifier une investigation de site repose sur la collecte d'information disponible et le passage à une campagne d'essais in-situ et au laboratoire. L'information qualitative reste présente durant toutes les étapes de l'investigation. Sa prise en considération est souvent liée à l'appréciation et au jugement de l'ingénieur et les outils mathématiques buttent souvent sur cet aspect de l'ingénierie.

Quand on parle d'information qualitative ou de manque d'information on revient au concept d'incertitude, qui est définie sous différents aspects. On retient principalement deux types d'incertitude, l'un peut être quantifiable aléatoire dû à la dispersion des données et l'autre non quantifiable épistémique relatif au manque d'information (Baecher et Christian, 2003).

L'utilisation de l'outil mathématique pour la prise en compte de l'incertitude dans les projets d'ingénierie, notamment en Géotechnique, ne date pas d'aujourd'hui. Beaucoup de travaux ont utilisé les probabilités et statistiques (Christakos, 1985 ; Baecher & Christian, 2003...), on peut citer les travaux de Chowdhury et al. (1987) pour l'étude des surfaces de glissement, ceux de (Baecher, 1984) sur la détermination des caractéristiques des paramètres de sols...etc. L'utilisation des probabilités se heurte le plus souvent au problème de manque de données. Pour qu'un modèle basé sur une approche probabiliste puisse avoir des résultats probants, il est nécessaire d'avoir suffisamment de données. Et lorsque l'aspect qualitatif de l'information doit être formulé cela devient extrêmement difficile.

Et ce sont justement ces incertitudes épistémiques qualitatives qui sont importantes à cerner pour la caractérisation de site. Comment les prendre en considération avec les outils mathématiques disponibles ? Le jugement de l'ingénieur est-il modélisable lors de la caractérisation de site ?

Nous nous sommes intéressés à cet aspect et nous avons trouvé que le champ d'intervention est vaste. Donc il a été nécessaire de cibler un problème particulier parmi tant d'autres auxquels l'ingénieur en Géotechnique est confronté.

L'investigation géotechnique comme on vient de le signaler est généralement conduite en deux étapes principales, l'une préliminaire consistant en un nombre limité de sondages ainsi que la collecte de l'information disponible et l'autre plus détaillée avec plus de sondages permettant de connaître au mieux les formations constituant le site d'étude. Il s'agit pour nous de reprendre le raisonnement de l'ingénieur dans cette démarche et modéliser de la manière la plus fiable possible la conduite de l'investigation.

Le nombre de points de reconnaissance à effectuer sur site n'obéit pas à des règles bien précises édictées dans des règlements ou codes de pratique. Ce qui est recommandé par les règlements (Eurocode7 à titre d'exemple) c'est uniquement un nombre minimum en fonction de la surface du projet à étudier. Le jugement de l'ingénieur y joue un rôle important. Or les paramètres influençant la densité des sondages (points de reconnaissance) sont divers tels que ; la géologie, la variabilité des paramètres de résistance du sol, le type de projet à implanter sur le site ainsi que l'information disponible sur les sites voisins. L'idée de base est de trouver le moyen de formuler ces paramètres et de les inclure dans un système d'inférence permettant de prendre en considération l'influence de chacun des paramètres sur le nombre de points de reconnaissance à effectuer sur site.

L'approche par système d'inférence Bayésien n'est pas possible dans ce cas, car l'information est vague et il n'y a pas moyen d'évaluer les probabilités conditionnelles des paramètres d'entrée sur la densité des sondages à exécuter. Nous nous sommes penché sur les possibilités qu'offrent les ensembles flous (Zadeh, 1965) dans la prise en compte d'une information incomplète et vague. Il s'est avéré que la construction d'un système d'inférence à base d'ensembles flous serait une solution viable. Il restait à

construire ce système, ce qui implique de formuler chacun des paramètres par des ensembles flous. La construction des ensembles flous pour traduire l'information contenue dans les paramètres intervenant en investigation géotechnique n'est pas facile, cela est dû principalement au manque de références dans ce domaine. Un questionnaire (Boumezerane, 2010) a été construit pour étayer la construction de ces ensembles et leur affecter des limites.

L'étape suivante est la conception du système d'inférence en se basant sur des règles logiques montrant l'influence de chacun des paramètres sur la densité des sondages à effectuer. Des données de la littérature technique ont été exploitées dans ce sens.

Le calage des résultats du système d'inférence a été rendu possible en utilisant les recommandations issues des règlements (Eurocode7, FHWA...) et d'autres auteurs (Hunt 2007, Simons et al. 2002). Deux approches sont mises en évidence et des exemples d'application ont montré la validité du système d'inférence ainsi que sa capacité à prendre en compte l'information qualitative et le jugement de l'ingénieur. Les résultats obtenus montrent une nette adéquation avec des situations réelles où l'ingénieur a procédé en se basant notamment sur son jugement.

Une analyse des résultats a été rendue possible en utilisant des simulations Monte Carlo des paramètres d'entrée du système. Cela donne un outil puissant permettant de combiner les ensembles flous avec les distributions de probabilités. Cet outil est très pratique pour la prise en compte des incertitudes. Il permet de faire sortir les résultats (densité des sondages) sous forme d'histogrammes et de distributions de probabilité.

Si les schémas de probabilité de type Bayésien n'ont pu être utilisés pour construire un système d'inférence, l'utilisation des ensembles aléatoires et des probabilités imprécises (Tonon & Bernardini, 2010) quant à eux ont montré de nouvelles pistes à explorer pour l'estimation de la densité de sondages pour investigation géotechnique. Nous avons introduit cet outil dans le cadre de ce travail de recherche et les résultats préliminaires nous incitent à développer davantage cette démarche qui se base sur les notions de probabilité comme degré de croyance. Il s'agit de construire des boîtes de probabilités supérieure et inférieure permettant de juger de l'intervalle de sondages à effectuer sur un site en prenant en compte l'information disponible (variabilité des conditions de site par exemple).

# **CHAPITRE 1**

# 1

## INCERTITUDES ET QUELQUES ASPECTS DE L'INVESTIGATION GEOTECHNIQUE

### INTRODUCTION

L'incertitude est définie comme une estimation graduelle du contenu de la vérité d'une proposition en relation avec l'occurrence d'un évènement (Möller et Beer, 2004). Les incertitudes peuvent être définies en trois types:

- Stochastique, Informelle ou Lexicale.

L'incertitude stochastique est présente lorsque les résultats aléatoires d'une expérience sous les mêmes conditions aux limites peuvent être observés presque indéfiniment et peuvent être décrits de manière déterministe en regard de leur occurrence.

L'incertitude informelle résulte d'un manque d'information. Par exemple lorsque peu d'observations sont disponibles l'analyse du système reste incomplète.

L'incertitude lexicale est celle que l'on qualifie par des variables linguistiques qui devront être transformées en quantités sur une échelle appropriée en vue de leur prise en compte dans les modèles.

D'après Baecher et Christian (2003) les sources d'incertitudes en géotechnique peuvent être classées en ; incertitude sur le paramètre du modèle ou de géométrie, incertitude sur le modèle et incertitude humaine. Le type d'incertitude peut être quantifiable aléatoire dû à la dispersion des données ou non quantifiable épistémique relatif au manque d'information.

La non-homogénéité du sol sous-jacent ainsi que l'utilisation d'échantillons en des points particuliers du milieu sont des facteurs de grande incertitude pour les

paramètres de résistance. Même si l'incertitude peut être réduite par des investigations elle ne peut être éliminée pour toujours.

Différentes méthodes existent en vue d'une description et quantification mathématique de l'incertitude. Elles incluent la théorie des probabilités, l'algèbre des intervalles, la modélisation convexe, la théorie du chaos, la théorie des ensembles flous et des variables aléatoires floues. Autant dire que les approches utilisées sont très variées.

Le but d'une caractérisation géotechnique de site est principalement de pouvoir estimer les propriétés du sol en tout point du milieu tout en utilisant un nombre limité de résultats de tests. Un certain nombre de sondages sont effectués en général et ils dépendent du type de projet à implanter ainsi que d'autres paramètres tels que la géologie et la topographie du site. L'information disponible sur ces paramètres peut être quantitative ou qualitative et son traitement s'appuie souvent sur le jugement de l'ingénieur.

Une investigation géotechnique est généralement effectuée en deux étapes, une première étape préliminaire consistant en quelques sondages de reconnaissance qui indiqueront si en deuxième étape il sera nécessaire d'en effectuer un grand nombre ou non.

Il n'y a pas de règle spécifique sur le nombre de sondages à effectuer dans un site. Selon Cambefort (1980) le nombre de sondages sur site dépend des résultats de l'étude préliminaire. Si un maillage grossier de sondages en première étape indique que le site du projet est relativement homogène on peut en rester là. Cependant, si les résultats de la première étape montrent une information erratique la caractérisation du site nécessitera davantage de sondages.

Les probabilités ont été largement utilisées pour résoudre des problèmes en géotechnique notamment lorsqu'il est question de traiter avec les différents types d'incertitudes. Un nouveau tournant dans le traitement des incertitudes fut connu avec l'avènement du concept d'ensembles flous introduit par Zadeh (1965). Il devint ainsi plus aisé de traiter des problèmes en ingénierie comportant d'importantes parts d'incertitudes et de flou (vagueness). En géotechnique les ensembles flous sont utilisés dans la classification des roches (Huang & Siller, 1997) dans les glissements de terrains (Saboya et al. 2006, Giasi et al. 2003), dans le calcul des tassements ainsi que dans

d'autres problèmes tels que la recherche des valeurs caractéristiques du sol (Boissier et al. 2000, Chuang 1995, Hu et al. 2003).

L'objectif du présent travail est de mettre en place une procédure systématique pour déterminer le nombre de sondages requis lors d'une investigation géotechnique. Un nombre optimal permettant de connaître au mieux les caractéristiques géotechniques du site. Pour ce faire nous avons choisi d'utiliser les ensembles flous comme base de raisonnement.

L'approche proposée consiste en la construction d'un système d'inférence basé sur les ensembles flous. Les paramètres tels que ; la nature géologique du site, sa topographie et le type de projet à construire, peuvent affecter de manière significative le nombre de sondages à exécuter sur site lors d'une investigation géotechnique. Ces paramètres sont décrits et formulés en termes d'ensembles flous. La théorie des ensembles flous introduite par Zadeh(1965) permet de traiter des paramètres ayant de l'information vague ou floue. Aussi elle permet de traiter des problèmes qui se présentent sous forme «linguistique» et qualitative. Chacun des paramètres d'entrée INPUT (Géologie, Topographie...etc) indique si un nombre important ou non est requis pour le site d'étude. Le système d'inférence flou permet d'implémenter des règles qui relient chacun des paramètres au résultat de sortie OUTPUT exprimé en terme de « densité » de sondages à effectuer. Les sondages sont exploités soit pour des essais in-situ (SPT...) ou bien pour des tests au laboratoire. Il n'existe pas de règle précise sur le nombre et la disposition des sondages à effectuer pour une investigation géotechnique de site.

## **1.1 LES CATEGORIES D'INCERTITUDES EN GEOTECHNIQUE**

Baecher et Christian (2003) ont noté trois grandes catégories d'incertitudes ayant trait à la géotechnique.

- La variabilité naturelle
- L'incertitude sur l'information
- Et les incertitudes opérationnelles.

La variabilité naturelle est associée au caractère aléatoire des processus naturels qui manifestent une variabilité de phénomène dans le temps et l'espace ou bien dans les deux.

L'incertitude sur l'information (le savoir) est attribuée au manque d'information sur les événements et processus. En géotechnique l'incertitude sur l'information est divisée en trois sous-catégories selon Baecher et Christian(2003); l'incertitude sur la caractérisation de site, l'incertitude sur le modèle et l'incertitude sur le paramètre.

L'incertitude de site est reliée à la concordance des interprétations que l'on a de géologie du sous-sol. Elle résulte des incertitudes d'exploration et de données qui incluent :

a) les erreurs de mesure, b) l'inconsistance ou l'inhomogénéité des données, c) les erreurs dans la collecte et la transcription des données et d) la mauvaise (incomplète) représentativité des échantillons due à des limitations dans l'espace et le temps.

L'incertitude de modèle tient du degré de fidélité avec lequel un modèle mathématique représente ou imite la réalité. Elle reflète l'incapacité du modèle à représenter de manière précise le vrai comportement physique d'un système, elle indique également notre incapacité à identifier le modèle le meilleur (le plus adéquat).

L'incertitude de paramètre a trait à la précision avec laquelle les paramètres d'un modèle peuvent être estimés. Elle résulte de notre incapacité à évaluer les valeurs d'un paramètre à partir de tests ou de données de calibration (calage). Le nombre limité d'observations ainsi que leur imprécision statistique rend encore l'incertitude de paramètre plus complexe.

Les incertitudes opérationnelles en géotechnique sont celles liées à la construction, la manufacture, la détérioration, la maintenance ainsi que les facteurs humains n'ayant été pris en compte dans les modèles de performance d'ingénierie. Les incertitudes de décision décrivent notre incapacité à connaître des objectifs sociaux ou de l'aversion pour le risque.

## **1.2 HISTORIQUE RESUME SUR L'INVESTIGATION GEOTECHNIQUE**

Les investigations géotechniques concernent une certaine recherche préliminaire sur les conditions qui prévalent dans un site sensé recevoir un projet donné. Dans le passé elles ont été conduites (les investigations) dans le but de répondre à des besoins immédiats afin de protéger le projet contre d'éventuels désastres naturels ou humains (les guerres par exemple). Les premières activités géotechniques de l'histoire humaine ont été dédiées à l'irrigation et le contrôle des crues et des inondations. Des traces de digues, de barrages et de canaux ont été retrouvées datant de pas moins de 2000ans avant l'ère chrétienne dans des contrées telles que la Mésopotamie et l'Egypte ancienne (Das, 2006). Avec la construction des cités de nouvelles formes de fondations ont été inventées telles que les pieux et les fondations superficielle attestées chez les grecs anciens.

Le type de sol imposait d'utiliser des pieux en bois sous l'ère Viking. Ils devaient en effet construire dans des sols argileux très mous et souvent c'était le seul moyen capable de supporter leurs constructions. Construire sur des fondations superficielles leur était tout simplement ruineux. On utilisait de l'investigation géotechnique basée sur l'observation à l'œil nu où le jugement humain était d'une grande importance. Il n'y avait pas d'appareil possible en ce temps là, et seule une certaine expérience des bâtisseurs et le raisonnement humain étaient possibles.

Les anciens égyptiens étaient de grands bâtisseurs et les monuments encore debout en sont la preuve. Il n'était évidemment pas possible de construire de tels ouvrages sans tenir compte de la nature du sol de fondation. Ils choisissent en général les terrains schisteux et des endroits solides et secs pour ériger les différents temples et monuments. Ils avaient le savoir nécessaire leur permettant de construire sur le bon sol aux bons endroits.

Jusqu'au 18siècle cependant il n'y avait pas de base théorique de calcul des capacités du sol. La discipline était plus un art basé sur l'expérience passée qu'une science (Das, 2006).

Les ingénieurs effectuent des investigations géotechniques afin d'obtenir l'information nécessaire sur les propriétés physiques des sols et roches constituant le site de

construction, ceci leur permettant de concevoir les travaux et les types de fondations adéquats. Une investigation géotechnique comporte une exploration en surface et une autre en sous-sol d'un site. Des méthodes géophysiques sont souvent utilisées pour extraire les données concernant le site. Des sondages se font régulièrement pour conduire des essais in-situ et extraire des échantillons de sol pour des tests au laboratoire. L'exploration de surface se fait en utilisant la cartographie géologique, les méthodes géophysiques et la photogrammétrie. Elle se fait également par des visites sur site qu'effectue l'ingénieur géotechnicien en relevant les conditions physiques du sol (Das, 2006).

L'exploration du sous-sol est nécessaire pour obtenir quelque information sur les conditions du site en sous-surface. Plusieurs méthodes d'observation des sols en sous-surface existent, telles que l'échantillonnage, la détermination des propriétés du sol et des roches à partir de puits d'essais, location des failles, conduite de sondages ainsi que des essais CPT (Cone Penetration Test) ou SPT (Standard Penetration Test). Le CPT permet d'enregistrer continuellement des données sur le sol en fonction de la profondeur, tandis que le SPT donne des mesures à des étapes données de changements majeurs de sol ; Il permet également d'extraire des échantillons pour des tests au laboratoire.

Deux grandes variétés de sondages sont utilisées en géotechnique, celle à large diamètre et l'autre à petit diamètre. Les sondages à large diamètres sont rarement utilisés pour cause de coût et de sécurité, mais ils permettent toutefois à l'ingénieur de faire un examen visuel et manuel de la stratigraphie du sol et des roches d'un site sur place. Les sondages à petit diamètre sont fréquemment utilisés, ils permettent à l'ingénieur d'examiner le sol à partir des échantillons et des résultats des sondages eux-mêmes évoluant en profondeur du sol. Des tests se font in-situ ou au laboratoire en utilisant ces sondages.

Parfois il est fait appel à l'exploration géophysique qui comprend des mesures sur les différents types d'ondes sismiques. Ce type d'exploration est seulement utilisé afin d'avoir une idée grossière sur les couches constituant le sol du site et donner une orientation sur les sondages à exécuter par la suite permettant de déterminer les propriétés géotechniques du milieu.

### 1.3 CARACTERISATION DE SITE

Les approches concernant la caractérisation de site ont été discutées dans différents livres et ouvrages traitant de l'ingénierie géologique plus que ceux de géotechnique, ils considèrent en général l'aspect relatif à l'équipement et l'instrumentation que l'aspect inférence et logique (Baecher et Christian 2003).

Dans un article discutant "les effets des détails géologiques mineurs sur la sécurité des barrages" Terzaghi, en 1929 (in Baecher & Christian, 2003) avait écrit "Les détails géologiques mineurs font référence à des traits ne pouvant être prédits ni par les résultats d'investigations de site ni par les moyens d'un nombre raisonnable de sondages pour tests. Ils concernent le type de détails pouvant se présenter comme la position exacte et les variations dans l'épaisseur de fissures dans une roche sous les fondations d'un barrage, la forme et les variations locales de la perméabilité de fines coutures, de sable grossier et de gravier contenus dans des vallées alluvionnaires ainsi que d'autres traits d'importance géologique mineure".

Ces détails sont d'une grande importance pour les investigations géotechniques à cause de l'échelle de caractérisation. Les premières stratégies d'exploration ont été développées dans les domaines du pétrole, du gaz et de l'industrie minière, elles ont changé au cours du temps. Les techniques utilisées communément sont basées sur les probabilités et statistique connues sous le nom de « Géostatistiques » (Matheron, 1963).

La connaissance des conditions de site n'est jamais parfaite à cause des sources d'information qui restent incomplètes et limitées. L'ingénieur est appelé à prendre des décisions en utilisant une information incomplète et loin d'être parfaite. En général quatre aspects sont nécessaires à connaître sur la géologie d'un site (Baecher et Christian, 2003) :

- La nature géologique des dépôts et formations
- La location, l'épaisseur et la composition matérielle des formations.
- Les propriétés mécaniques des formations puisqu'elles peuvent affecter le rendement des installations sur le site.
- Ainsi que le niveau des eaux souterraines et leurs fluctuations.

## 1.4 EXPLORATION ET INVESTIGATION

L'exploration est connue comme étant le processus de collecte de l'information qui pourrait être utilisée pour construire d'importantes hypothèses. Celles-ci seront utilisées ultérieurement pour expliquer des mesures détaillées ayant été effectuées. Elle (l'exploration) inclut l'histoire de la géologie régionale et locale du site et indique si des anomalies significatives seraient prises en considération. L'exploration est un processus d'induction et de construction d'hypothèses (Baecher et Christian 2003). L'investigation quant à elle est liée à la collecte de l'information (mesures) sur laquelle seront basés les modèles et les calculs.

Dans la caractérisation de site il est fait appel à l'exploration et à l'investigation en même temps. Peck en 1980 (in Baecher & Christian, 2003) indique que le développement d'hypothèses requiert une connaissance et de la familiarité avec la mécanique des sols et la géologie. Un ensemble d'hypothèses est construit en se basant sur les résultats observés. Des méthodes quantitatives d'analyse sont ensuite implémentées pour supporter les modèles de sol mis en place.

La reconnaissance consiste en l'étude de documents et d'information disponibles. Elle contient une revue de la géologie locale et régionale. Des hypothèses qualitatives sont ensuite mises en place.

L'investigation préliminaire est la collecte des premières informations quantitatives sur site. Elle aide à conforter les hypothèses qualitatives et ainsi passer à un premier ensemble d'hypothèses quantitatives. La localisation et la description des formations majeures sont déterminées par un nombre limité de sondages, par une cartographie du site et éventuellement par des techniques géophysiques. Les hypothèses quantitatives sont ainsi générées en se basant sur les résultats préliminaires.

L'investigation détaillée a pour objet de confirmer les hypothèses quantitatives mises en place en première investigation. Une information plus précise sur les propriétés du sol est recherchée à travers une cartographie détaillée et un programme de sondages sur site.

La plus part des résultats sont obtenus pour des points précis éparses et séparés les uns des autres dans l'espace. L'interprétation de ces résultats par l'ingénieur est importante

car elle permet de faire des inférences et prendre des décisions ensuite. L'importance des sondages et des résultats des tests réside dans le support qu'ils peuvent apporter aux hypothèses de départ.

Selon Roce (1972) (in Baecher & Christian, 2003) les projets sont à classer en trois grandes catégories suivant les exigences d'une caractérisation de site ;

En catégorie A, sont les projets importants et risqués, où la complexité de la géologie locale nécessite une investigation détaillée (barrages, centrales nucléaires...).

La catégorie B englobe les projets où des incertitudes sont tolérées. Dans ce genre de projets l'ingénieur cherche à connaître le degré de difficulté de l'exploration et de l'investigation

Dans la classe C on rencontre des projets de moindre risque où des investigations relativement petites sont nécessaires.

#### **1.4.1 Modèles de caractérisation de site**

Selon Baecher et Christian (2003) un ensemble d'étapes est requis en caractérisation de site ;

- Développement d'hypothèses sur la géologie du site.
- Construction d'un modèle de processus aléatoire basé sur les hypothèses et qui décrit la géologie du site et les paramètres mécaniques du milieu.
- Effectuer des observations (mesures) sur site ou au laboratoire.
- Réaliser une analyse statistique des résultats d'observations et faire des inférences sur le modèle de processus aléatoire.
- Appliquer l'analyse de décision pour optimiser le nombre et la location des observations.

Le développement d'hypothèses sur la géologie d'un site est plus un acte ayant trait avec l'intuition et le jugement que sur les formalités d'un raisonnement logique (Baecher & Christian 2003).

Les modèles de processus aléatoires utilisés sont en général des modèles de variation spatiale des propriétés d'un milieu. Ils décrivent comment les propriétés du sol peuvent varier dans l'espace. Ils sont utilisés parce qu'il n'est jamais possible d'avoir un nombre

suffisant d'observations pour caractériser le site. Ils permettent de faire des interpolations à partir des points d'observation existants.

D'autres techniques sont aussi utilisées pour la caractérisation de site telles les réseaux de neurones ou les réseaux flous de neurones ils combinent un certain nombre d'observations (mesures) sur site et permettent de les utiliser pour générer les propriétés du sol en d'autres locations du site.

### **1.5 LE PROCESSUS D'INVESTIGATION**

Clayton(2005) dans une étude sur les investigations géotechniques indique que celles-ci sont généralement définies selon les étapes suivantes :

- Définition du projet ; où le travail d'investigation consiste en des conseils de la part d'un conseiller 'adviser' géotechnicien sur les possibilités de dimensionnement offertes.
- Sélection de site ; à partir des sources préliminaires d'étude sur les sites éventuels et valables avec pour chacun des atouts ou inconvénients en termes géotechniques.
- Design de conception, dans lequel des informations préliminaires sont utilisées et des campagnes d'inspection sur site effectuées pour prévoir le plan d'investigation du sol.
- Design détaillé ; concerne une investigation totale du site ainsi que le design géotechnique.
- Construction ; dans cette étape sont comparées les conditions de site actuelles et prévues, une évaluation de nouveaux risques est effectuée.
- Interprétation et maintenance ; concerne le suivi des résultats et le feedback obtenu à partir de ceux-ci.

Dans l'étude préliminaire des sources d'information, celles-ci sont rassemblées à partir; de la topographie du site, des problèmes et des paramètres géotechniques, de l'état des eaux souterraines, des conditions météorologiques ainsi que d'éventuelles informations d'un usage précédent du site.

### 1.5.1 Etapes de l'investigation

L'étude de bureau 'Desk study' est souvent présentée comme " l'évaluation initiale" ou « l'étude des sources préliminaires », elle est essentielle pour obtenir une première compréhension de la géologie du site et du comportement vraisemblable du sol. L'étude de bureau en plus de la collecte et de l'examen de l'information existante, devrait inclure une visite guidée du site (Greenwood, 2005).

Durant la visite du site des photographies sont prises et un contrôle des conditions de site sur place est effectué. Les résultats obtenus de cette visite sont assemblés avec les détails de la topographie, de la géologie, des problèmes de géotechnique et de paramètres ainsi que des conditions de la nappe. Le rôle de l'étude de bureau est bien plus large que la simple détermination des conditions vraisemblables du sol et des roches, cependant c'est l'une de ses fonctions les plus importantes (Clayton et al. 2005).

Les cartes d'études sur le sol, les cartes géologiques et les photographies aériennes sont autant d'informations utiles pour l'étude de bureau. Les rapports de sol sur d'éventuelles anciennes études permettent de mieux connaître les conditions du site aussi. Quand aux cartes topographiques elles aident à mieux comprendre les conditions relatives niveau de l'eau dans le site.

Il est impératif que l'ingénieur géotechnicien conduise une reconnaissance de visu du site de projet. Ceci permettra d'avoir une bonne appréciation des éléments relatifs à la géotechnique, la topographie et la géologie du site. (FHWA, 1997). Suite à la collecte et l'évaluation des informations récoltées des différentes sources (cartes...etc) l'ingénieur sera prêt à planifier un programme d'exploration sur site. Les méthodes d'exploration, les conditions de sondages ainsi que les types et la fréquence des tests à exécuter seront déterminés en se basant sur l'information existante et les exigences du projet. L'ingénieur devra développer un plan global d'investigation qui lui permettra d'obtenir les résultats nécessaires pour la définition des conditions du sous-sol et ainsi effectuer les calculs pour dimensionnement. Un ingénieur géologue peut souvent fournir des informations d'entrée concernant les types de formations géologiques présentes sur site qui serviront dans l'interprétation et le planning. Pour ce type d'investigation des cartes géologiques à une échelle de 1/2500 sont les mieux adaptées pour connaître les couches

de sol à partir de sondages (Clayton et al. 2005). Le programme d'investigation est fréquemment changé pour s'adapter aux variations des conditions de sous-sol rencontrées durant le travail.

Selon 'Union Syndicale Géotechnique" (2005) un programme d'investigation géotechnique devrait être établi sur la base de trois éléments majeurs ;

- La nature de l'ouvrage à réaliser
- Le contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique ; une enquête documentaire (notamment analyse des cartes géologiques, des banques de données du sous-sol, des plan de préventions des risques, des études antérieures...). La visite du site. Une enquête de voisinage.
- La zone d'influence géotechnique ; zone d'interaction entre le projet, le terrain et l'environnement.

L'ingénieur géotechnicien doit prendre en compte les spécificités du site et de l'ouvrage et il est responsable quant à d'éventuelles investigations supplémentaires si nécessaire. Les campagnes d'investigation géotechnique sont limitées quant au nombre de sondages et de tests à exécuter, elles ne peuvent pas éliminer toutes les incertitudes relatives au sol, mais il est nécessaire de réduire le plus possible ces incertitudes conformément aux possibilités financières du projet.

Les sondages et tests géotechniques les plus utilisés sont regroupés en trois catégories ;

- Sondages, permettant de visualiser le sol, établissant la stratigraphie et la structure géologique du sol.
- Les tests de laboratoire pour identifier, classer les sols et mesurer leurs propriétés mécaniques et hydrauliques.
- Les essais in-situ permettant de mesurer certains paramètres géotechniques des sols sur site, liés à leur nature, leur consistance, leur perméabilité, leur déformabilité et leur résistance.

Une investigation appropriée devrait être conduite en assurant un certain équilibre entre essais in-situ, sondages avec échantillons et tests de laboratoire.

## 1.6 LES SONDAGES

La caractérisation de site selon Terzaghi et Peck (in Huang & Siller 1997) comprend la construction d'un profil de sol en interpolant entre les sondages (trous de forage) et les échantillons pour diviser le sous-sol en zones ayant approximativement les mêmes propriétés mécaniques. L'utilisation des sondages en investigation géotechnique est d'une importance capitale. A ce stade l'ingénieur pourrait avoir plus de détails sur le profil de sol. Une investigation peut aller de quelques puits d'essais pour un petit projet ; à une large campagne de sondages pour un projet important. Les puits d'essais sont efficaces pour des profondeurs relativement petites allant jusqu'à 6m. Le niveau de l'eau et ses effets sur la stabilité du terrain peuvent être observés à travers ces puits. Des tests de perméabilité peuvent être effectués sur le site aussi.

Cependant les puits d'essais posent le problème de la perturbation du sol, pour cette raison ils sont généralement exécutés en dehors de la zone de l'ouvrage à construire.

Les forages sont également utilisés, telles les sondes de pénétromètre ou les sondages géophysiques pour des compléments d'information. Les sondages sont utiles et efficaces en général, des échantillons peuvent en être extraits pour des essais en laboratoire additionnels à ceux in-situ. Les orientations concernant l'espacement et la profondeur des sondages ainsi que l'échantillonnage dépendent du type de projet et de l'information préliminaire existante.

Les techniques de forage sont différentes, elles dépendent du terrain s'il est ou non difficile. Il y a principalement deux types de forages, l'un statique et l'autre dynamique. Pour les investigations géotechniques on utilise des forages à diamètre inférieur à 100mm. Ils peuvent servir tout autant pour des essais in-situ que pour des essais au laboratoire lorsque des échantillons en sont tirés. Les sondages dynamiques sont effectués avec des cônes qu'une masse d'un certain poids enfonce par chute d'une certaine hauteur. Le nombre de coups nécessaires à l'enfoncement du cône nous informe sur la résistance du sol.

### 1.6.1 Fréquence et profondeur des sondages

L'emplacement et la fréquence des sondages dépendent du type de structure à construire, des formations du sol et des roches présents, de l'information sur la variabilité de la stratification ainsi que les charges auxquelles sera soumis le sol de fondation. Pendant que la réhabilitation d'une chaussée pourrait requérir des sondages d'une profondeur moins de 4m à des endroits montrant certaines perturbations, le dimensionnement et la construction d'un important pont pourrait nécessiter des sondages allant jusqu'à 30m de profondeur voire plus (FHWA, 1997).

Le tableau qui suit donne les lignes principales pour la sélection du minimum de sondages tant en terme de profondeur, de fréquence que d'espacement pour différents types d'ouvrages géotechniques. Il est fréquent d'aller au-delà de la profondeur minimale recommandée pour s'assurer une information suffisante au cas où l'ouvrage à construire nécessiterait de nouvelles exigences.

Un exemple de technique utilisée est celle dite de pénétration statique au cône qui consiste à pousser un cône instrumenté dans le sol à une vitesse donnée en enregistrant la résistance au point et par frottement. Il est ainsi possible de mesurer les changements de types de sol à différentes profondeurs.

### 1.6.2 Recommandations sur les profondeurs minimales des sondages: (FHWA,1997)

#### ***Domaine d'investigation    Profondeur des sondages***

Fondation de ponts

Fondations pour routes

Semelles de répartition    Pour des semelles isolées de longueur L et largeur B avec  $L < 2B$  les sondages devraient aller jusqu'à un minimum de deux fois la largeur en dessous du niveau des fondations.  
Pour des semelles isolées avec  $L > 5B$ , les sondages doivent aller jusqu'à un minimum de profondeur de 4 fois la largeur de la fondation.

Pour  $2B < L < 5B$  on utilise l'interpolation linéaire entre  $2B$  et  $5B$  pour déterminer la profondeur minimale.

Fondation profondes	<p>Dans le sol les sondages doivent aller au moins jusqu'à 6m de profondeur au-delà la pointe prévue du pieu. Un minimum de deux fois la longueur du pieu est aussi recommandé (ce qui est plus profond).</p> <p>Pour des pieux ancrés dans la roche un minimum de 3m est requis dans le substratum.</p> <p>Pour les puits ayant support dans le substratum (rock) un minimum de 3m est requis. Ou bien une profondeur de 3fois le diamètre du puits lorsque celui-ci est isolé. Si c'est un groupe de puits on exige une profondeur de 2fois la plus grande dimension du groupe de puits. Ces profondeurs sont calculées à partir de la pointe prévue du puits.</p>
Murs de soutènement	<p>On prend une profondeur de 0.75 à 1.5fois la hauteur du mur. Si la zone stable est situé en profondeur les sondages devraient être continués jusqu'au substratum.</p> <p>Pour des fondations profondes utiliser les mêmes critères que pour les fondations de ponts.</p>
Chaussées	<p>La profondeur minimale de sondage requise est de 2m en dessous de la couche de fondation.</p>
Excavations	<p>Les sondages devraient se faire jusqu'à une profondeur de 5m au dessous de la hauteur prévue de l'excavation. Quand des sols mous posent problème les sondages seront étendus plus loin.</p>
Remblais (talus, digues)	<p>La profondeur des sondages doit être de deux fois la hauteur du talus.</p>

La fréquence et l'espacement des sondages dépendent de la variation prévue des conditions du sous-sol, du type d'ouvrage à implanter ainsi que des phases d'exécution de l'investigation (qui peut révéler au fur-et-à-mesure de nouvelles données sur le sol). Pour les routes par exemple des espacements importants de l'ordre de 300m ou plus entre sondages sont suffisants notamment dans des zones où les conditions de sol sont uniformes. Pour des études préliminaires de projets le nombre de sondages est généralement limité et leurs espacements assez grands de manière à permettre de prendre uniquement des décisions de base concernant le projet. Quant au design final d'un ouvrage, des espacements plus réduits seront nécessaires et le nombre plus important de sondages mettra en exergue plus de détails sur les conditions du sous-sol. Dans le tableau suivant, nous proposons quelques lignes générales sur le nombre minimal de sondages requis en fonction des projets (FHWA, 1997).

Les programmes d'investigation géotechnique doivent être suffisamment flexibles pour permettre de s'adapter à des variations dans les conditions géotechniques du site durant le forage.

### 1.6.3 Lignes directrices sur le plan (schéma) des sondages

Type de projet	Plan des sondages
Fondations	1 par sous-structure de moins de 30 de largeur. 2 par sous-structure de plus de 30m de largeur
Fondations de ponts	2 sondages minimaux pour des fondations de plus de 30m de largeur. 1 sondage lorsque la largeur est inférieure à 30m. Pour des conditions géologiques erratiques des sondages additionnels sont à prévoir.
Mur de soutènement	Un minimum de 1 sondage pour chaque mur de soutènement est requis. Pour des murs plus longs que 30m il faudra que l'espacement entre sondages soit inférieur à 60m.

Chaussées	L'espacement ne doit pas excéder les 60m. L'espacement et l'emplacement des sondages doivent être choisis de manière à considérer la complexité géologique ainsi que la continuité de la stratification dans le sol en définissant des limites horizontales et verticales pour les différentes formations du site.
Excavations (conduits etc)	Un minimum de 1 sondage est nécessaire pour chaque excavation. Lorsque la longueur dépasse les 60m il faudra prévoir des sondages tous les 60 à 120m le long de l'excavation. Dans des zones critiques il est requis au moins 3 sondages en largeur pour définir les conditions de stabilité de pente.
Remblais (Quai, Digue..)	Les mêmes critères que pour les excavations sont requis.
Glissements (stabilité des pentes)	Minimum 2 sondages sur une ligne perpendiculaire pour établir une coupe géologique. Le nombre de coupes dépend du cas d'étude. Pour une zone active au moins un sondage au-dessous et l'autre au-dessus de la zone de glissement.
Carrières	Des sondages espacés de 30 à 60m. une exploration plus poussées peut être requise en fonction du site.

### ***Tests In-situ***

Certains types de sol (argiles) peuvent être facilement échantillonnés et transportés au laboratoire pour des essais. D'autres sol tels que les argiles sensibles, les sables et les graviers ne peuvent rester « non-perturbés » d'où la nécessité d'essais in-situ pour obtenir leurs paramètres géotechniques. Il existe trois groupes d'essais in-situ ;

- Les essais empiriques où aucune analyse fondamentale n'est possible et les chemins de contraintes sont incontrôlés (exemple le SPT)
- Les essais semi-empiriques où des relations limitées entre paramètres et mesures peuvent être développées (exemple CBR, test de perméabilité...)
- Les essais analytiques où les chemins des contraintes sont contrôlés ( Van Shear test, Pressiomètre...)

### ***Essais dans argiles-silteuses (Silty-Clay Soils)***

Les essais SPT à effectuer dans les argiles silteuses sont en général recommandés dans des intervalles de 1.5m ou bien lors de changements significatifs de stratification dans le sous-sol. Dans les mêmes trous de forage sont extraits des échantillons pour essais au laboratoire aussi, ceux-ci doivent être « non-perturbés ». Ils seront destinés aux essais de consolidation (analyse des tassements) et aux essais de résistance (stabilité et analyse de la capacité portante des fondations).

Dans les graves sableuses les échantillons du SPT sont pris tous les 1.5m d'intervalle ou à des changements importants de la stratigraphie du sol. Des échantillons continus de SPT sont recommandés dans les premiers 4.5m de profondeur de sondages effectués à des endroits prévus pour des semelles superficielles. Des échantillons sont aussi envoyés au laboratoire pour tests de classification.

### ***Tests de Laboratoire***

Les essais de laboratoire sont divisés en deux classes principales:

- Essais de classification (limites d'Atterberg, Granulométrie...)
- Essais pour estimer les propriétés mécaniques du sol (essais de cisaillement, compressibilité, perméabilité...)

Il est important de planifier le régime des essais à effectuer avant le début des sondages sur site pour permettre d'extraire les échantillons requis du terrain (localisation et nombre de sondages à effectuer)

### ***Report des résultats***

Le travail sur l'investigation du site est reporté en enregistrant tous les résultats, il est d'une importance capitale, et devrait inclure:

- Une présentation de l'objet de l'investigation
- Une description du travail effectué.
- L'emplacement, le nombre et la profondeur des sondages exécutés.
- L'enregistrement des résultats des tests in-situ et au laboratoire.
- Un plan du site.

Les résultats enregistrés (diagraphie) constituent le cœur du rapport puisque ils déterminent l'information à différentes locations du site. L'interprétation des résultats est la tâche qui incombe à l'ingénieur et demande un sens aigu de jugement et d'expérience sur terrain.

## **CONCLUSION**

Les incertitudes sont un facteur majeur lorsqu'une investigation géotechnique est prévue. Elles se manifestent de différentes manières ; Variabilité naturelle, Incertitude sur l'information (savoir) ainsi que les incertitudes opérationnelles (Baecher et Christian 2003).

La conduite d'une investigation géotechnique requiert une somme d'informations préliminaires qui introduit ce que l'on appelle une étude de bureau (enquête documentaire). Cette enquête est essentiellement basée sur l'information disponible sur le site telles les cartes géologiques et les précédentes études géotechniques dans le voisinage si elles existent. A ce stade l'ingénieur cherchera du côté de la géologie du site pour connaître les unités et dépôts constituant le sol, détermine la structure géologique régionale ainsi que la topographie du site. L'utilisation ancienne du site pourrait être un éventuel facteur de risque qu'il serait nécessaire de prendre en considération pour une future investigation géotechnique.

L'étude préliminaire est suivie d'une exploration détaillée qui aide à confirmer les hypothèses qualitatives et passer ainsi à un ensemble d'hypothèses quantitatives. La description et la localisation des formations majeures se fait par l'intermédiaire d'un nombre limité de sondages, de cartographie du site et éventuellement par des techniques géophysiques. Les résultats préliminaires permettent de poser les premières

hypothèses quantitatives. Une investigation détaillée cherchera à confirmer ces hypothèses, ainsi une information plus détaillée sera recherchée en usant d'un programme de sondages et de cartographie du site. Les résultats obtenus le sont pour des points donnés de l'espace du site. Des inférences deviennent nécessaires dans ce cas pour estimer les caractéristiques à travers l'ensemble du site en se basant sur des méthodes probabilistes en général et sur l'expérience de l'ingénieur.

La question fondamentale qui reste posée est de savoir comment traiter avec les incertitudes en géotechnique et quels sont les moyens dont on dispose pour cela. Les approches basées sur les probabilités nécessitent d'importants nombres de données à incorporer dans un modèle d'analyse. De ce fait leur utilisation s'avère difficile. Les données n'étant pas aussi abondantes en géotechnique. L'utilisation des ensembles flous (Zadeh, 1965) constitue de ce fait une alternative intéressante du fait de leur adaptabilité au raisonnement humain et leur capacité à traiter avec des problèmes où les données sont rares ou se présentent sous forme incomplète. Pour cette raison nous avons opté dans notre démarche pour l'utilisation des ensembles flous.

# **CHAPITRE 2**

# 2

## ETUDES BIBLIOGRAPHIQUE DE QUELQUES ASPECTS DES INCERTITUDES EN GEOTECHNIQUE

### INTRODUCTION

L'une des étapes les plus importantes dans une investigation géotechnique est celle relative à l'estimation du nombre et l'emplacement des sondages sur site. Basée sur l'information à extraire de ces sondages, l'analyse permet de construire un modèle de sol le plus proche possible de la réalité. Comme le volume de sol à tester reste limité la construction de ce modèle devient difficile. Parsons et al. (2002) indique qu'en général le volume de sol à tester pour une investigation géotechnique représente environ 1/100.000 ou moins du volume du site. L'ingénieur utilise les données extraites de ces tests pour interpréter la structure et le comportement potentiel du sous-sol du site d'étude.

Plusieurs paramètres influencent notre décision quant au nombre de sondages à effectuer sur site, parmi lesquels on peut citer ;

- La géologie locale et régionale du site
- La topographie du site
- Le type et la nature de l'ouvrage à construire
- Les résultats disponibles des sites avoisinants

Chacun des paramètres influence la décision de l'ingénieur concernant l'investigation géotechnique d'un site, et plus spécialement le nombre de sondages à y accomplir. Le problème qui se pose est de savoir comment on peut prendre en considération tous ces paramètres lors d'une analyse. Ils (les paramètres) s'expriment de façon qualitative et linguistiques en général ; sous forme de cartes géologiques à titre d'exemple.

Les incertitudes rencontrées en géotechnique sont, généralement, prise en compte en utilisant les probabilités et statistiques, et ceci requiert une importante quantité d'information. Le manque d'information et le caractère vague qui subsistent en géotechnique rendent de ce fait l'analyse incomplète et difficile.

En 1965 Zadeh a introduit le concept d'ensemble flou qui traite justement de l'aspect vague de l'information rencontré dans le domaine du signal dans les circuits électroniques. Les variables linguistiques dans les ensembles flous furent introduites en 1978 par le même auteur.

Dans notre approche nous avons opté pour l'utilisation des ensembles flous pour leur adaptabilité au problème qui nous intéresse, à savoir la prise en compte des incertitudes dans l'estimation de la densité des sondages pour une investigation géotechnique sur site.

Après une description du problème, nous présentons dans cette section une revue sommaire des études ayant pour thème le traitement des incertitudes en géotechnique en utilisant différentes méthodes d'analyse (probabilités, statistiques...).

## **2.1 DESCRIPTION DU PROBLEME**

La caractérisation géotechnique d'un site est entreprise en usant de sondages, qui peuvent suivre un planning aléatoire ou ordonné, et leur nombre est le plus souvent basé sur l'appréciation de l'ingénieur. L'objectif de cette étude est de proposer une procédure systématique permettant d'estimer le nombre de sondages requis pour connaître de manière adéquate le site d'un ouvrage.

Il n'y a pas de règles particulières concernant la distribution des sondages à effectuer dans un site (Magan, 2000). Elle dépend des données préliminaires disponibles et de certains paramètres tels que ;

- Le contexte géologique de la zone d'étude
- La topographie
- Le type d'ouvrage
- Les données disponibles sur les sites avoisinants

Une investigation géotechnique est, généralement, conduite en deux étapes principales. La première consiste en une investigation préliminaire par quelques sondages permettant d'avoir une idée grossière de la caractérisation du sol. Cette étape permet de conduire de manière plus détaillée la seconde étape de caractérisation du site. Le deuxième volet de l'investigation est basé sur les résultats de l'investigation préliminaire ainsi que sur l'appréciation de l'ingénieur.

Cambefort (1980) indique qu'il n'y a pas de règle précise sur le nombre de sondages à effectuer sur site. Il note que le nombre des sondages à exécuter dépend des résultats de l'étude préliminaire. Si un maillage grossier de sondages dans l'étape préliminaire informe sur une relative homogénéité du sol donc on peut en rester là et l'investigation est jugée satisfaisante. Si les résultats de la première étude indiquent que les conditions de site sont erratiques il sera nécessaire de conduire un nombre plus important de sondages. L'US corps of Engineers (1994) indique que pour des projets d'ouvrages de soutènement le nombre de sondages à exécuter en seconde étape est généralement de 02 à 05 fois le nombre de ceux effectués durant le stade préliminaire de l'investigation.

L'approche que nous proposons, pour déterminer le nombre de sondages optimal pour une caractérisation adéquate de site, consiste en la construction d'un système d'inférence basé sur les ensembles flous. Les paramètres tels que, la nature géologique du site, la topographie et le type d'ouvrage à construire qui peuvent affecter le nombre de sondages, sont ainsi pris en considération et décrits. La théorie des ensembles flous (Zadeh, 1965) permet de traiter des paramètres dont l'information est vague et imprécise. Elle permet également de traiter avec des paramètres qu'on exprime le plus souvent sous forme linguistique et qualitative. Chaque paramètre d'entrée (Input) du système indique si un nombre important ou non de sondages est requis. La construction du Système d'Inférence Floue permet la mise en exécution d'un nombre de règles floues en prenant en considération l'influence (le poids) de chaque paramètre sur la densité des sondages. L'avantage d'utiliser les ensembles flous est que l'incertitude considérée n'est pas statistique, et ils permettent la construction de règles basées sur des variables linguistiques.

## **2.2 REVUE SUR LA LITTÉRATURE TECHNIQUE**

### **2.2.1 Des probabilités et statistiques aux ensembles flous**

La représentation de l'incertitude a fait l'objet de beaucoup de débats dans tous les domaines de l'ingénierie et de la science. Pour ceux utilisant les probabilités il n'y a qu'un seul modèle pour l'incertitude numérique, ce sont les probabilités. Mais les probabilités ont leurs problèmes. Pour une raison que les nombres ne sont toujours pas disponibles (Halpern, 2003). Le lien aux nombres fait que deux événements quelconques devraient être comparables en termes de probabilités : soit l'un des événements est plus probable que l'autre ou ils ont une probabilité égale. Il est impossible de dire que deux événements soient incomparables en vraisemblance.

D'autres représentations de l'incertitude ont été considérées dans la littérature. Elles comprennent les ensembles de mesure de probabilités, les fonctions de croyance de Dempster-Shafer, les mesures de possibilité basées sur les ensembles flous ainsi que les fonctions de classement. Toutes ces représentations sont numériques. Les études ayant trait aux incertitudes dans le domaine de la géotechnique sont diverses, elles ont ciblé plusieurs aspects et ont utilisé les probabilités comme moyen en général.

Christakos (1985) a utilisé une analyse statistique pour estimer les paramètres d'un dépôt de sol à partir de mesures éparses, cependant il s'est basé sur un modèle d'éléments finis déterministe. Deux sources principales d'erreur ont été considérées ; les erreurs de mesure et la variabilité spatiale. L'intérêt s'est porté sur la construction de contours et profils indiquant la variation spatiale des paramètres de sol estimés. Le modèle construit est basé sur des variogrammes et montre une carte d'estimation des erreurs pour les tassements dans un site. Il aide à estimer où il serait nécessaire d'implanter des sondages supplémentaires ultérieurs afin de minimiser les erreurs en question.

L'évaluation de la qualité d'une investigation géotechnique a fait l'objet d'une étude menée par Parsons et al.(2002). Il a défini le concept de « rigueur continue (continuous thoroughness) » pour faciliter l'évaluation de la qualité des activités de caractérisation de site. Les valeurs de la « rigueur » sont des probabilités transformées en indices de couleurs pour faciliter la représentation graphique et voir si la variable en question dans une zone donnée dépasse un certain seuil. C'est une représentation visuelle

complémentaire qui aide à mieux évaluer la qualité d'une caractérisation. Les données utilisées sont les différentes mesures obtenues à partir d'une multitude de sondages effectués lors de séries d'investigations géotechniques qui peuvent s'étaler sur des années dans un site. Les données analysées sous forme de sous-ensembles peuvent révéler de significantes informations qui ne sont pas apparentes lorsque de chaque sondage on utilise une moyenne unique des résultats. L'auteur a simulé l'augmentation de données et a montré que la « rigueur » dans ce cas augmente mais le taux de variation (augmentation) diminue au fur et mesure que le nombre de données devient grand.

Une étude de cas en relation avec le risque géotechnique et l'inadéquation d'une investigation de site a été effectuée par Jaksa(1998). L'analyse s'est intéressée plus à l'aspect financier d'une investigation géotechnique que sur les propriétés du sol. L'information préliminaire indique un site avec une variabilité spatiale importante ce qui nécessitera un programme supplémentaire de sondages et d'essais. Le National Research Council (Australie) a recommandé que pour une investigation géotechnique adéquate un niveau de ressources financières de l'ordre de 3% du budget total du projet est nécessaire. Mais pour Jaksa (1998) ceci dépend de la taille du projet, il juge que 0.1 à 0.3% de la somme du projet aurait été suffisant pour des projets particuliers. Il a été recommandé aussi que pour une investigation géotechnique efficace il faut passer par une étape préliminaire préfigurant une investigation détaillée reposant sur les premiers résultats.

L'analyse des anomalies dans un site a fait l'objet d'une étude par Tang(1993). En utilisant un schéma probabiliste il a estimé la probabilité d'occurrence d'une anomalie pour une configuration donné de sondages. Pour une probabilité à priori d'absence d'anomalie et une distribution préalable basée sur le jugement de l'ingénieur avant le programme d'exploration, l'événement de « ne pas rencontrer » une anomalie avec certains sondages permet de mettre à jour à chaque fois la probabilité d'absence d'anomalie ainsi que la distribution conjointe (présence et taille de l'anomalie). Le jugement de l'ingénieur sur la géologie du site est très important dans ce cas, et sa connaissance de la géologie locale permet d'appliquer une technique de mise-à-jour Bayésienne pour l'évaluation des anomalies.

Selon Baecher (1984) dans "Just A Few More Tests and We'll be Sure!" la nature même d'une caractérisation de site est basée sur la familiarité de l'ingénieur avec la géologie, sur l'expérience et sur l'intuition. L'exploration géologique est fondée sur un raisonnement inductif. Les méthodes « rationnelles » de statistique et de recherche opérationnelle permettent de mettre un peu de lumière sur la plupart des problèmes de base pour l'interprétation de l'histoire de la géologie. Une approche pratique d'analyse des données a été présentée par Baecher. Il utilise des méthodes statistiques simples adaptées aux problèmes de géotechnique et il montre qu'elles sont bénéfiques. Les exemples traités se sont focalisés sur trois grandes questions :

- Comment distinguer la variabilité réelle des propriétés du sol du « bruit » induit par les mesures (instruments) ?
- Comment sélectionner les paramètres de calcul d'un sol à partir de mesures éparses et dispersées ?
- Comment évaluer la fiabilité des calculs et choisir des facteurs de sécurité adéquats ?

Les techniques d'analyse de données utilisées permettent de supprimer les erreurs aléatoires de mesure et permettent aussi de sélectionner des paramètres de calcul ainsi que des facteurs de sécurité adéquats.

Dans une autre étude intitulée "Just One More Boring, And We'll Know For Sure" Liao et al. (1996) ont analysé la situation où des sondages supplémentaires sont rendus nécessaires à cause de nouveaux changements imprévus dans un projet ainsi que de circonstances qui n'ont pu être anticipées durant l'exploration du site. Ils ont étudié la décision de savoir combien de sondages additionnels étaient requis pour affiner l'information existante sur le sol. Ils ont utilisé un arbre de décision déterministe à deux branches indiquant les deux décisions possibles, exécuter ou non un sondage. Dans une seconde étape ils ont introduit l'incertitude dans la décision en utilisant les probabilités pour chaque situation. Des cas d'étude schématiques ont montré la complexité des décisions. Plusieurs facteurs affectent ces décisions ;

- Les explorations du sous-sol ne sont toujours pas concluantes à cause des incertitudes inhérentes aux conditions du milieu (sol),
- Sous estimation des coûts de l'exécution des forages (sondages),
- Les limitations dans les techniques d'analyse pour déterminer la profondeur adéquate des sondages, et

-Le risque de changements dans le dimensionnement du projet lorsqu'il est question d'effectuer ou non un programme de sondages, ces changements peuvent être plus coûteux que ce qu'on gagnerait en obtenant plus d'information sur le site.

Les auteurs mentionnent clairement qu'un programme de sondages additionnels ne veut pas dire qu'on saura pour sûr. L'incertitude persiste même après l'exploration.

La variabilité du sol est multidimensionnelle et les études qui se sont multipliées sur cet aspect s'intéressent en général à la variabilité dans les directions horizontale et verticale. Caffaro & Cherubini (2002) ont analysé l'influence de l'espacement des échantillons sur l'évaluation de la variabilité verticale de la résistance d'un sol argileux. Des données de CPT ont été tirées d'échantillons espacés verticalement et traitées par des moyens statistiques. Le but était de vérifier les effets de l'espacement sur la tendance moyenne des paramètres du sol et sur les éléments décrivant la variabilité verticale de la résistance du sol. Les résultats ont montré comment l'espacement des échantillons de CPT peut influencer l'évaluation des paramètres décrivant la variabilité verticale de la résistance d'un sol argileux. Il est important, selon les remarques des auteurs, d'identifier quand il est nécessaire de supprimer la tendance (moyenne) quadratique plutôt que la moyenne linéaire. En général, une augmentation de l'espacement de 0.2m à 0.4m semble induire une surestimation de l'échelle de fluctuation. En vue d'un programme de caractérisation les auteurs ont proposé de subdiviser un site générique en secteurs en se basant sur l'échelle de fluctuation verticale.

L'analyse de la fiabilité en géotechnique a débuté autour de 1970, et l'utilisation des probabilités a rapidement gagné du terrain dans ce domaine. Dans un chapitre, à propos de la stratigraphie et des propriétés d'un matériau qui sont modelés par la nature, Baecher (1998) a noté que la géométrie du sous-sol nécessitent d'être inférés à partir d'observations (sondages) limités et que les dépôts de sol et son histoire de chargement ne peuvent qu'être supposés ou devinés. Par conséquent la caractérisation géotechnique est inductive. La variabilité spatiale n'est pas « aléatoire » ; La variabilité c'est la différence réelle dans les propriétés des sols d'un point à un autre dans ce qui est assumé être un dépôt homogène. Si l'information est suffisante l'ingénieur peut en principe caractériser un dépôt de sol avec une résolution très fine et ainsi connaître sa

variabilité. Mais ceci n'est jamais le cas, on peut utiliser la moyenne des propriétés du sol ou résumer le manque d'information en utilisant les statistiques.

Les méthodes géostatistiques ont été appliquées pour interpréter des résultats d'explorations géotechniques. Auvinet et al. (2001) ont conduit une étude en utilisant la théorie des champs aléatoires à travers des réalisations partielles de données d'essais. L'utilisation des géostatistiques permet l'estimation des valeurs d'une propriété en des points où il n'existe pas d'enregistrements en prenant en considération l'information disponible collectée en d'autres points. La méthodologie utilisée par les auteurs pour développer l'analyse géostatistique a consisté en cinq étapes ;

Acquisition de données, analyse structurelle, inférence statistique, visualisation des résultats, analyse des résultats et interprétation, ensuite applications. Cet outil offre une approche rationnelle pour interpréter des données géotechniques et évaluer la variabilité spatiale du sous-sol. Il aide aussi à une meilleure définition de la configuration complexe du sous-sol d'un site.

La variabilité spatiale intervient dans différentes études sur les propriétés du sol, en exemple l'analyse de la stabilité des pentes. Sung(2007) a effectué une recherche sur les incertitudes relatives à la variabilité du sol en utilisant une approche probabiliste basé sur des simulations Monte Carlo. L'approche permet de chercher la surface de glissement critique et de conduire une analyse préliminaire de sensibilité sur la sélection de certains paramètres aléatoires comme des champs aléatoires. Les propriétés du sol sont représentées comme des champs aléatoires. Les variations dans la probabilité de rupture ont été évaluées en se basant sur la variation des paramètres de sol de plusieurs couches. L'analyse conduite sur des profils de sol en utilisant des champs aléatoires bi-dimensionnels a montré l'importance de la variabilité des propriétés du sol sur les résultats d'une évaluation probabiliste.

La théorie des champs aléatoires développée par Vanmarcke (1977) a été utilisée dans différentes études traitant du problème de la variabilité du sol. Vanmarcke dans un article sur la « modélisation probabiliste des profils de sol » a présenté de nouveaux concepts et méthodes pour modéliser la variabilité naturelle des propriétés du sol. La technique de modélisation du caractère statistique des profils de sols, sert ;

-A fournir un format pour quantifier l'information rassemblée durant une investigation de site et à partir des essais sur le sol effectués in-situ.

-Elle fournit la base pour prédire et quantifier la fiabilité du système.

Les champs aléatoires sont un moyen adéquat qui permet de traiter différents types d'incertitude liés à la variabilité spatiale du sol. Cependant le besoin d'avoir une information suffisante sur site constitue le principal « handicap » ou inconvénient des approches statistiques et probabilistes.

Jaksa et al. (2003) dans une étude traitant de la quantification de la fiabilité des investigations géotechniques, argumente sur le fait qu'une série de lignes directrices sont nécessaires pour lier l'objet d'une investigation géotechnique avec la probabilité de rupture (ou de sous-dimensionnement) d'une fondation— qui résultera de dépenses supplémentaires. Les dépenses sur les investigations géotechniques varient considérablement entre 0.025% et 0.3% du budget total du projet. Il a été démontré que des niveaux bas d'investigation induisent de larges incertitudes, qui le plus souvent conduisent à des dépenses additionnelles imprévues. Jaksa et al. a fait remarquer qu'une bonne investigation géotechnique comprend un programme de sondages et d'échantillonnage ainsi que des essais au laboratoire.

Le nombre, la profondeur et la localisation de ces sondages, échantillons et tests sont définis qualitativement par la géométrie de la structure (ouvrage), les charges induites par la structure ainsi que le profil anticipé du sous-sol. L'ampleur d'une investigation est, généralement basée sur le jugement de l'ingénieur. Les paramètres qui influencent le plan d'investigation selon les auteurs, sont ;

-Caractéristiques géotechniques du site— nombre de couches, stratigraphie et - variabilité des propriétés géotechniques,

-La réponse à des charges externes (structure et fondations),

-L'objet de l'investigation géotechnique.

L'étude effectuée par Jaksa et al. (2003) a permis le développement d'une série de lignes directrices permettant aux planificateurs de comparer divers programmes d'investigation géotechnique. Le schéma ainsi présenté aide à quantifier la probabilité de rupture et de surdimensionnement pour chaque investigation en prenant en compte la variabilité spatiale, la stratigraphie, l'objet de l'investigation, les erreurs de mesure ainsi que les phases d'investigation.

De récentes études utilisant les probabilités sont orientées vers l'estimation des facteurs de sécurité et de probabilité de rupture pour différents types de structures. En

géotechnique conventionnelle la même valeur du facteur de sécurité est utilisée pour un type d'application, tel la stabilité à long terme des pentes, sans regard pour le degré d'incertitude induit dans les calculs.

Les calculs de fiabilité fournissent les moyens de calculer les effets combinés des incertitudes ainsi que la possibilité de distinguer des conditions où les incertitudes sont particulièrement importantes ou faibles.

Duncan(2003) interprète l'événement "probabilité de rupture" comme une rupture qui n'est pas nécessairement catastrophique. La théorie de la fiabilité, selon d'auteur, peut être appliquée en géotechnique à travers des procédures simples et ne demande pas plus de données que pour l'analyse avec les méthodes conventionnelles. Elle fournit un cadre logique pour le choix de facteurs de sécurité appropriés pour un degré d'incertitudes et de conséquences de rupture.

Un modèle probabiliste de rupture progressive d'une pente de sol a été présenté par Chowdhury & Tang (1987) dans lequel différents modes de progression de la rupture sont considérés. L'incertitude sur la résistance au cisaillement est prise comme étant composée au moins de deux éléments importants ;

- a) La variabilité inhérente de la résistance au cisaillement
- b) L'erreur systématique de modèle.

Il a été assumé que l'incertitude statistique, résultant d'un petit nombre de tests ou d'observations est incluse dans l'erreur systématique. Chacun des paramètres de résistance au cisaillement (résistance au pic, résistance résiduelle) sont décrits par un champ aléatoire homogène qui peut prendre en considération l'erreur de modèle systématique, la variabilité inhérente du sol et l'incertitude statistique due à nombre de tests de cisaillement inadéquats.

Le modèle fournit une nouvelle perspective concernant la progression de la rupture le long des surfaces de glissement des pentes de matériaux cohésifs ( $\varphi=0^\circ$ ).

Sur un autre plan mais toujours en relation avec le nombre de sondages sur site, Van Raalte et al. (1999) se sont intéressés au problème de dragage dans les sols pour connaître la géotechnique d'un site pour différents types de projets.

Lors de la planification pour de nouveaux projets il sera question d'effectuer des dragages de quantités importantes de sol. Pour ce faire des sondages seront nécessaires pour connaître la quantité de sol à extraire.

Combien de sondages ou de tests pénétrométriques sont nécessaires par million de mètres cubes de matériau à draguer. Combien d'échantillons seront suffisants pour des essais de laboratoire. Une formule a été proposée par Bates (1981) et elle est fonction de la surface de dragage  $A$  et l'épaisseur de la couche  $d$ . ( $N=3+A^{0.5}*d^{0.33}/50$ ). La formule est simple et considère le sol comme étant homogène, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Pour l'évaluation du profil géotechnique des sondages et essais de pénétration sont nécessaires. En géotechnique les valeurs inférieures des paramètres sont prises en considération pour l'analyse (de stabilité par exemple). Par contre dans les problèmes de dragage, celui-ci provoque de l'instabilité dans les couches de sol et l'ingénieur dans ce cas se doit de prendre en considération les valeurs supérieures des paramètres.

Nombre de lignes directrices sont suggérées incluant;

- Un minimum de 30 points sont nécessaires pour être statistiquement significatifs, ce qui suggère de 5 à 6 sondages.

Farmer et al.(1996) ont expliqué l'importance de compresser toute l'information à partir des essais in-situ et de laboratoire pour améliorer les investigations sur site. Deux applications simples de la géostatistique sont utilisées. Un variogramme qualitatif a été utilisé en premier, ils ont testé l'adéquation de l'espacement entre sondages pour estimer la variation en épaisseur d'une couche de sol.

La seconde application montre comment la corrélation entre données peut être utilisée pour estimer les caractéristiques de points ou de blocs. Une base pour tester l'adéquation de l'espacement des trous de forage a été exposée pour déterminer la variation en épaisseur d'une ou plusieurs couches dans un site.

Il s'agit ensuite de concevoir une investigation conventionnelle de site en utilisant un espacement donné entre sondages et exécuter un variogramme d'essai.

Si la forme semi-variogramme se trouve proche de l'idéal, alors l'espacement est suffisamment bon pour échantillonner adéquatement la variation de l'épaisseur.

Si le variogram montre une faible continuité alors, il faudra sélectionner de nouvelles positions pour les trous de forage pour obtenir un espacement réduit, ou bien choisir une surface plus petit de la zone totale pour une exploration plus détaillée.

Pour l'analyse des glissements de terrain induits par la pluie une investigation a été conduite par Thielen et al. (2005). L'approche est une combinaison entre essais géotechniques classiques et tomographie. Les essais géotechniques permettent d'interpréter la plasticité et la granulométrie du terrain tandis que la seconde technique permet d'avoir des images spatiales haute résolution du sous-sol en termes de résistivité électrique. Ce type de combinaison peut être utilisé dans la caractérisation de site en interprétant les données obtenues des sondages (essais in-situ et de laboratoire) ainsi que les techniques de tomographie. La tomographie tend à constituer un outil complémentaire pour mieux extraire davantage d'information du sol.

Dans la même optique que précédemment Sudha et al.( 2009) se sont focalisés sur la caractérisation de sol en utilisant la tomographie par résistivité électrique et les investigations géotechniques. La tomographie par résistivité électrique associée au SPT(Standard Penetration Test) et au DCPT(Dynamic Cone Penetration Test) ont été utilisés pour des investigations géotechniques sur deux sites prévus pour des projets de centrales thermiques. Le concept de variation de la résistivité électrique avec la résistance du sol a été utilisé pour corréliser la résistance transverse du sol et le nombre de coups N obtenu du STP et du DCPT. La résistance du sol est fonction de la granulométrie, de la cimentation, de la porosité et de la saturation. L'étude a montré l'utilité de la méthode ERT (Electrical Resistivity Tomography) dans les investigations géotechniques, qui est économique, efficace et ne consomme pas beaucoup de temps en comparaison à d'autres techniques telles le SPT et le DCPT utilisés dans cette application.

Marache et al.( 2009) ont entrepris une étude sur la construction d'un modèle géotechnique 3D à l'échelle d'une ville à partir d'un nombre important de sondages et de tests (plusieurs centaines). Ils ont montré comment la combinaison de l'information lithologique et des résultats géotechniques peut améliorer, avec l'aide de statistiques Bayésiennes, notre connaissance sur les caractéristiques mécaniques des terrasses

alluviales qu'on peut rencontrer dans cette zone. Les données sont tirées de sondages ayant été effectués dans le périmètre de la ville en question. Les données disponibles des sites voisins ont été aussi utilisées pour améliorer le modèle. Un total de 2050 sondages a été rassemblé pour l'étude. Des enregistrements de pressiomètre, pénétromètre ont été récupérés à différents endroits de la ville de Pessac (France).

Le but de l'étude était de chercher un moyen permettant d'apporter une valeur ajoutée aux données géologiques et géotechniques, soit en ajoutant de l'information sur la lithologie probable ou estimer la valeur des propriétés géotechniques là où elles ne sont pas disponibles. A cet effet les méthodes probabilistes basées sur une inférence Bayésienne ont été utilisées. La distribution statistique des différentes formations a été établie en fonction de la profondeur, de la localisation dans le domaine et des propriétés géotechniques. Ces propriétés peuvent être modelées en 3D en utilisant les géostatistiques de façon à obtenir des résultats en termes de probabilité et des modèles qui pourront être utilisés plus tard dans les systèmes d'aide à la décision.

Baguelin & Kovarik (2000) ont présenté une méthode pour la détermination des valeurs caractéristiques de paramètres géotechniques, qui fait intervenir le niveau de risque. La détermination de ces valeurs est basée sur une analyse statistique de données de sol.

Les variations des paramètres de résistance tels que la cohésion ou l'angle de frottement sont étudiées en prenant en compte les incertitudes statistiques. La régression linéaire est un moyen adéquat pour servir à la détermination de ces paramètres. La méthode de traitement statistique ainsi proposée respecte l'objectif risque de 5% indiqué par les Eurocodes. Par rapport à la théorie statistique et probabiliste la méthode proposée comporte un certain nombre de simplifications, notamment concernant la réduction de l'écart-type, qui semble adaptée à la pratique de la géotechnique.

Nathanail & Rosenbaum (1998) ont conduit une étude sur la caractérisation de sites pour identifier celui qui conviendrait le mieux pour un type de projet donné (hauts fourneaux dans ce cas). L'objet de l'étude était de développer des techniques pour la gestion de données sur le site en utilisant les SIG (Système d'Information Géographique) et les géostatistiques. Les investigations ont été effectuées quelques 20 ans auparavant et les aciéries construites 10 ans après. Les détails sur les sondages, tirés des rapports de sol, furent introduits dans une base de données en usant de structure relationnelle

avec des fichiers liés. L'emplacement des sondages et la lithologie du sol ont été saisis en utilisant des codes pour le matériau géologique, le degré d'érosion, la résistance et le type de forage. La gestion orientée objet des données géotechnique peut offrir un moyen utile pour la compréhension de la géologie du site.

### **2.2.2 Utilisation des ensembles flous**

Comme nous venons de le voir d'après les quelques études citées, les probabilités et les statistiques sont largement utilisées lorsqu'il est question de traiter des problèmes de géotechnique où les incertitudes sont présentes, notamment dans le cas des investigations de site. Après l'introduction par Zadeh(1965) du concept d'ensembles flous, l'approche sur les incertitudes prit une nouvelle direction. La théorie des ensembles flous permet de traiter des problèmes où le manque d'information (données) et l'imprécision sont présents. Elle s'accommode aussi du raisonnement humain en utilisant des «variables linguistiques » pour décrire la réalité. L'idée principale consiste à remplacer les ensembles classiques, dans lesquels l'appartenance d'un élément à l'ensemble est de la forme 0 ou 1 (appartient ou non), par des ensembles flous permettant d'exprimer l'appartenance d'un élément par des fonctions d'appartenance variant entre 0 et 1. Ce qui veut dire que l'on peut avoir un élément qui appartient à l'ensemble (A) avec un degré d'appartenance  $\mu_A$  et à un ensemble B avec le degré d'appartenance  $\mu_B$ . D'autres développements sur les ensembles flous seront exposés dans un chapitre différent. Dans ce qui suit nous présentons un sommaire de quelques études utilisant le raisonnement flou pour la caractérisation de sites en général. L'objet étant de faire une introduction au sujet de recherche objet de notre thèse.

Dans un article sur l'évaluation du risque géotechnique, Oberguggenberger & Fellin (2001) ont mis en relief les questions de base concernant l'interprétation de la probabilité utilisée dans le concept de sécurité des ouvrages dans le cas d'une fondation carrée. Il a été démontré que la probabilité de rupture dépend d'une manière extrêmement sensible du choix des fonctions de distributions d'entrée (Input). Les paramètres de sol montrent des variations spatiales et locales et ils ne peuvent être mesurés exactement en chaque point du site, aussi le sol est spatialement non-homogène. Tous ces effets contribuent à la variabilité des données. Lorsque les données sont disponibles nous devons avoir au moins 20 résultats pour que ce soit

statistiquement valide (loi des grands nombres). Lorsque la distribution des paramètres d'entrée change la probabilité de rupture est fortement influencée. Il a été démontré qu'un changement de fonction d'entrée d'une distribution « Normale » vers une distribution « Triangulaire » affecte la probabilité de rupture d'une variation entre  $10^{-3}$  et  $10^{-11}$  ce qui constitue une modification très importante. Les auteurs ont recommandé l'utilisation des ensembles flous pour décrire les incertitudes de paramètres. La construction de ces ensembles est basée sur le jugement de l'ingénieur quant à l'évaluation du risque en utilisant des plages (intervalles) de valeurs possibles.

Les ingénieurs géotechniciens sont souvent en face de prendre des décisions dans un environnement imprécis. Quelques stratégies ont été empruntées à d'autres disciplines telles les finances. La détermination des composants définissant un modèle de décision implique le traitement des données disponibles en information applicable pour le problème étudié. Salwa Ammar (1989) a présenté de nouveaux concepts traitant d'un problème de décision de base, elle a discuté les lignes directrices à partir desquelles « la meilleure » décision peut être déterminée en accord avec l'environnement imprécis et flou. Elle a visé dans son étude à inclure des représentations non probabilistes dans la modélisation d'un processus de décision.

Le champ des données en géotechnique étant très imprécise et incertain Boissier (2000) a proposé l'utilisation des théories des ensembles flous et des fonctions de croyance. Dans les problèmes d'ingénieur, c'est en début de résolution que l'espace des solutions est des plus grands mais c'est aussi à ce moment là que l'espace des données disponibles est le plus petit et que les conséquences d'une décision sont les plus importantes car réduisant fortement l'espace des solutions. Les informations disponibles pour résoudre un problème donné sont souvent disparates, provenant de sources diverses. La question reste posée par exemple sur le choix de l'ancrage d'une fondation quand on ne dispose que de quelques données. Un constat a été établi sur le fait que l'ingénieur est capable de porter « intuitivement » ou par « une expertise non explicite » un jugement plus sûr que celui donné par des modèles précis mais trop restrictifs. Il peut exprimer le vague et l'imprécis par le langage souvent éloigné de celui utilisé par les théories de ensembles et des probabilités. Avec l'avènement de la théorie des ensembles flous développée par Zadeh (1965), la possibilité de traiter avec des « variables linguistiques » est rendue

quantifiable. La théorie des fonctions de croyance (Dempster-Shafer) est de mise aussi puisque elle permet de représenter l'ignorance et l'incertain, de prendre en compte toutes les informations existantes sur un sujet donné quel que soit leur provenance, leur format, et de dégager une information consensuelle. Selon Shafer (1976) il y a des règles de « fusion des données » ou « d'unification de données » basées sur des hypothèses ; - de toute information il y a quelque chose à déduire ; - à chaque information est attachée une masse de croyance, un attribut précisant la qualité de cette information. Le problème est donc de construire (ou de calculer) une information résultante à partir de plusieurs informations. Boissier (2000) a traité un certain nombre d'exemples usant de ces techniques (Fuzzy Sets, Dempster-Shafer). L'application au cas d'une fondation superficielle de deux approches possibilistes (ensembles flous) et probabilistes pour l'analyse de la fiabilité a montré qu'elles sont complémentaires. L'approche possibiliste nécessite peu d'informations ; la modélisation est plus proche des pratiques des concepteurs, elle est fiable mais peu informative selon l'appréciation de l'auteur. L'approche probabiliste, quant à elle, nécessite des informations beaucoup plus précises et son langage est éloigné des pratiques des concepteurs. Elle reste complexe à mettre en œuvre, mais elle se ramène à un critère facilement utilisable.

Pour prévoir les tassements d'une fondation superficielle il a été proposé d'utiliser les ensembles flous en cherchant à voir quelle est la compatibilité entre une solution proposée et un objectif à atteindre qui sont tous deux imprécis (Boissier et al., 1995). Il s'agit de voir qu'elle sera la compatibilité (une mesure entre ensembles flous) entre un tassement prévisionnel et le tassement admissible d'une semelle. Différents degrés de compatibilité sont calculés et montrent si la solution préconisée est compatible avec l'objectif. Disposant d'une base de données qui contient pour chaque matériau un intervalle de variation pour une caractéristique donnée. A chaque intervalle est associé un indicateur de la qualité de l'estimation normé entre 0 et 1. Un utilisateur fournit une caractéristique d'un sol ainsi que la confiance qu'il accorde à la mesure : à quelle classe peut-on associer ce matériau ?

Il est question de classer l'argile, telle que présentée par un utilisateur, par rapport à la référence. Un calcul de confiance utilisant les ensembles flous a montré une comparaison entre ce qui est décrit et les cas de référence pour statuer sur la couche considérée. Ainsi dans ce cas l'argile est retenue comme étant « plastique » car elle a le

degré de vraisemblance le plus élevé et proche de 1 par rapport à la référence. La méthode présentée permet de quantifier la possibilité qu'une caractéristique appartienne à une classe donnée, un outil d'aide à la décision que peut utiliser l'ingénieur géotechnicien.

Dans (Boissier, Boulemia et Semman, 1998) l'exemple traité concerne une couche d'argile dont le module pressiométrique est donné. Les cas de référence sont donnés selon des intervalles de variation dans le domaine plastique ; il s'agit de consistance, Molle, Plastique et Raide selon les valeurs du module pressiométrique. Dans cette étude, il est associé une modélisation par ensemble flou à chaque intervalle.

Les modélisations probabilistes et possibilistes comme souligné par Boissier (2000) ne sont pas conflictuelles mais alternatives ou complémentaires. La modélisation possibiliste (basée sur les ensembles flous) paraît mieux adaptée à la gestion du qualitatif et de l'information incomplète. La modélisation probabiliste demande de l'information quantitative et complète, mieux adaptée à la phase de calcul détaillé. Quand elles sont utilisées ensembles, la théorie des ensembles flous et les probabilités, elles deviennent complémentaires les unes les autres dans le sens où les ensembles flous sont bien adaptés à l'information qualitative et les méthodes probabilistes utilisables lorsque une quantité de données est disponible.

Une analyse probabiliste incluant des variables floues a été initiée par Rahman et El-Zahaby (1997). Le risque de liquéfaction a été analysé usant d'une méthode probabiliste avec ensembles flous. Les variables qui affectent le processus de liquéfaction, connues de manière vague et décrites seulement en termes linguistiques imprécis, sont traitées comme des variables floues. L'effet combiné de ces variables est introduit dans un modèle basique de liquéfaction par l'évaluation d'un nombre flou moyen qui sera transformé en variable aléatoire. La probabilité de liquéfaction est alors formulée dans le cadre d'une analyse probabiliste de risque usuelle. Le concept d'entropie a été introduit dans cette étude comme une mesure de l'incertitude d'une variable aléatoire, le même concept est utilisé pour mesurer l'imprécision d'une variable floue.

Huang et Siller(1997) ont approché le problème de caractérisation géotechnique de site en utilisant un raisonnement basé sur les ensembles flous. Dans leur étude ils ont présenté une méthode basée sur les ensembles flous pour représenter les données

collectées à partir d'échantillons d'un sondage. Un système d'inférence a été développé pour le profil du sous-sol. La comparaison entre deux échantillons de sol en vue de leur classification se fait en utilisant le concept de différence floue (Calcul de la distance entre deux ensembles flous). Les règles floues adoptées sont de la forme ; SI « Différence floue » est « Similaire » alors l'existence d'interface est « Peut être possible ». L'utilisation de ces règles permet au système de caractérisation adopté de donner une description des couches de sols possibles dans le site.

Dans un autre type d'application Hu et al. (2003) les ensembles flous ont été utilisés dans un système expert pour la caractérisation de sites contaminés au pétrole. Les données d'entrée du système comprennent l'information sur l'emplacement, la granulométrie de chaque échantillon du sol ainsi que les caractéristiques physiques des couches de sol au dessus des échantillons prélevés. Les ensembles flous du système expert décrivent les caractéristiques hydrauliques du site telles que ; le degré de perméabilité, l'hétérogénéité, l'isotropie, l'anisotropie et la propriété hydraulique globale du site définie comme simple ou complexe. Les règles floues sont construites à partir d'appréciations d'experts dans le domaine. Un exemple de règle est ; SI sol « Homogène » et « Isotropique » et « Perméabilité importante » ALORS la complexité est « simple ». Basé sur nombre de règles floues le système fournit donc un outil d'aide à la décision pour des utilisateurs cherchant à définir les caractéristiques hydrauliques d'un site qui sont cruciales pour l'indentification des alternatives et solutions de sites contaminés par le pétrole.

Nombre de système experts sont implémentés en utilisant des ensembles flous pour les possibilités que ces derniers offrent quant à la prise en compte des incertitudes et de l'information incomplète. Dans les systèmes classiques (binaires) l'analyse se trouve limitée.

Genske et Heinrich(2009) dans l'analyse d'un terrain dégradé, se sont basés sur un système expert flou qui permet d'améliorer la qualité d'une étude de bureau (desks study) sur l'investigation de la contamination d'un site abandonné. Le système mis en place aide l'ingénieur à traiter la multitude d'informations disponibles pour prendre des décisions adéquates. Seulement une partie des données est sous forme « nette » et est capable d'être traitée par les outils classiques. L'information est souvent formulée selon

le jugement de l'expert (ingénieur) et la logique floue est l'outil approprié pour son traitement dans ce cas.

Dans le concept de dimensionnement aux états limites la détermination des valeurs nominales (caractéristiques) est d'une importance capitale notamment lorsqu'il n'y a qu'un nombre limité de données disponibles. Les incertitudes relatives aux propriétés géotechniques mesurées d'un sol ont fait l'objet d'une étude par Nawari et Liang (2000). Les paramètres géotechniques mesurés ont été transformés en ensembles flous et les valeurs nominales ont été obtenues par fuzzification.

Etant donné un nombre de résultats de taille « n » chaque élément sera traité comme une variable floue. L'information additionnelle obtenue de l'expérience, du jugement de l'ingénieur et d'autres sources sera implémentée dans la définition des variables floues. Une moyenne « M » des variables est déterminée. La valeur nominale du paramètre sera estimée en utilisant différentes techniques (centroid, déviation floue...). Pour caractériser la fiabilité des propriétés géotechniques mesurées l'ingénieur devra combiner, en plus des données actuelles, l'information sur la qualité des données, le savoir sur la géologie ainsi que les aspects environnementaux du site. Le système présenté par les auteurs permet d'inclure les incertitudes dans les propriétés géotechniques mesurées et fournit une procédure pratique pour estimer les valeurs caractéristiques des géo-matériaux.

La résistance au cisaillement des sols mesurée par des tests de laboratoire peut être différente des valeurs obtenues par essais in-situ. Ceci est dû aux imperfections de mesure des propriétés du sol au laboratoire. Chuang (1995) a conduit une étude sur ce problème en utilisant les ensembles flous. Les opinions des experts et l'expérience sont usuellement exprimés en termes linguistiques, et peuvent être utilisés pour évaluer des biais ou erreurs de mesure. La théorie des ensembles flous est un outil adéquat pour ce type d'information subjective. Les paramètres qui peuvent faire l'objet de différences entre les valeurs des essais de cisaillement au laboratoire et sur site incluent ; l'effet de l'anisotropie, perturbation de l'échantillon, l'effet du taux de chargement, effet d'échelle et autre. Au laboratoire la magnitude de chacun de ces paramètres peut être estimée par un expert (ingénieur) en usant de valeurs linguistiques comme ; « petit », « moyen » etc. Un facteur de correction flou est défini pour exprimer la différence entre les résultats au laboratoire et in-situ. L'auteur propose un système à règles floues basé sur le jugement

de l'ingénieur qui permet une mise-à-jour des résultats expérimentaux à des valeurs plus réalistes représentatives des essais in-situ. La limitation mentionnée par l'auteur à propos de ce facteur de correction réside dans la difficulté de déterminer les plages appropriées de valeurs en se basant sur les données de la littérature. Ce type de limitation est commun à beaucoup d'études utilisant les ensembles flous. Comment construire des ensembles flous en se basant uniquement sur l'information disponible ; le jugement de l'ingénieur est capital dans ce genre de situations.

Tout comme pour les probabilités qui sont très utilisées dans l'évaluation de la susceptibilité des pentes aux glissements, la logique floue devient un outil intéressant dans l'estimation du glissement lorsque l'information disponible est faible et les incertitudes importantes. Saboya et al.(2006) ont proposé une méthodologie basée sur la logique floue pour l'estimation de la susceptibilité au glissement des pentes naturelles et dans laquelle l'opinion de l'expert est prise en compte. Il a présenté une méthodologie sur comment tenir compte du jugement de l'ingénieur et de son expérience exprimés en termes linguistiques. Nombre de facteurs d'importance influant la stabilité des pentes sont pris en compte et chacun d'eux est inféré selon les réponses d'ingénieurs et de géologues. En assemblant des informations supplémentaires il est possible de mieux affiner les ensembles flous construits. L'outil proposé est pratique et facile à utiliser.

### **2.2.2 Utilisation des réseaux neuronaux flous**

Lors de la caractérisation d'un site les données sont assemblées de différents points du sol. Les propriétés du sol sont uniquement connues en ces points. Différentes méthodes ont été proposées pour extrapoler les propriétés au-delà de ces positions. Matheron(1971) avait introduit un nouvel outil connu sous le nom de « géostatistique » basé sur le concept de variogramme mesurant la variabilité d'une propriété donnée. La théorie des champs aléatoires telles que présentée par Vanmarcke(1977) a permis d'analyser la variabilité des sols avec des outils pertinents. Avec l'avènement de la théorie des réseaux de neurones plusieurs applications ont trouvées part en géotechnique. Et dans le but de mieux prendre en considération les incertitudes rencontrés dans les sols une variante des réseaux de neurones dite « flous » est devenue aussi très utilisée (Shahin et al. 2001).

Basée sur l'information disponible en certains points du sol, cette théorie permet de créer des propriétés en des points où des mesures n'ont pas été prises. Romo et Garcia (2003) ont étudié une procédure pour estimer les propriétés dynamiques d'un sol à partir d'une base de données de résistances CPT. La méthode est basée sur une formulation hybride intégrant les réseaux de neurones et la logique floue.

Les cartes produites par cette méthode sont de bonne qualité selon les auteurs. La combinaison d'une information représentée par des ensembles flous et le pouvoir d'apprentissage des réseaux de neurones a permis de tester le système pour générer un modèle lisible des propriétés dynamiques dans le site.

## **CONCLUSION**

Quelques exemples d'études utilisant les probabilités et les ensembles flous en géotechnique ont été présentés de manière sommaire dans ce chapitre, le but étant de montrer les différentes approches et leur faisabilité lorsqu'il s'agit de prendre en considération le problème des incertitudes, notamment pour la caractérisation de site. Le sommaire est loin d'être exhaustif et général dans ce domaine. Les exemples cités montrent l'importance de chercher de nouveaux outils permettant de traiter des problèmes dont l'information et les données sont vagues ou imprécises, ce qui n'est pas une tâche aisée et nécessite d'avoir une large vue sur les paramètres affectant en particulier les investigations géotechniques objet de notre étude. Le manque et l'imprécision de l'information caractérisent souvent les sites destinés à recevoir des ouvrages donnés. L'évaluation des conditions d'un site, pour rupture par glissement, liquéfaction sous chargement dynamique ou autres types de hasards se fait généralement en utilisant les probabilités, les méthodes statistiques ou la théorie des ensembles flous. La question du traitement de la variabilité des paramètres de sol reste un challenge pour les ingénieurs géotechniciens. Vanmarcke (1977) a introduit la théorie des champs aléatoires pour les sols en se basant sur les probabilités et les concepts de traitement de signal.

Les méthodes statistiques et probabilistes sont sophistiquées et demandent en général une quantité importante de données pour être utilisées. De l'autre côté la théorie des ensembles flous permet de traiter avec l'imprécision et le manque d'information que l'on

rencontre souvent dans les problèmes de géotechnique. Lorsqu'elles sont utilisées ensembles (Rahman et El-Zahaby, 1997) les probabilités et les ensembles flous sont complémentaires et permettent d'avoir des résultats intéressants. L'appréciation et le jugement des experts sont en général exprimés en termes linguistiques, cet aspect est bien appréhendé par les ensembles flous à travers le concept de « variable linguistique » (Zadeh, 1975). Lorsqu'elles sont combinées avec un ensemble de règles floues, les variables linguistiques permettent de schématiser le raisonnement des experts et ainsi obtenir des résultats sur les décisions à prendre.

Les réseaux de neurones flous se sont imposés dans la caractérisation des sols et montrent de nouvelles perspectives quant à la simulation des conditions de site en des points où les données manquent (Romo et Garcia, 2003). Les incertitudes s'expriment sous différents aspects, et les moyens mis en place pour les prendre en considération sont aussi divers. Le plus important à notre avis est de choisir l'outil le plus adéquat pour un problème donné.

# **CHAPITRE 3**

# **3 FORMULATION DES PARAMETRES INFLUENCANT UNE INVESTIGATION GEOTECHNIQUE, UTILISATION DES ENSEMBLES FLOUS**

## **INTRODUCTION**

Comme nous l'avons introduit précédemment, les incertitudes en géotechnique sont classées en trois catégories. Selon Baecher et Christian (2003) les sources d'incertitudes associées aux analyses en géotechnique peuvent être classées comme ; l'incertitude sur les paramètres de modèle appelée aussi géométrique, l'incertitude sur le modèle et l'incertitude humaine. Les types d'incertitude peuvent être aussi bien aléatoire quantifiable relative à la dispersion des données, ou non-quantifiable épistémique relatives au manque d'information (de savoir).

L'incertitude qui nous concerne dans notre cas est liée au manque de données et au caractère vague de l'information que nous rencontrons dans les investigations géotechniques. Lorsqu'on effectue une investigation géotechnique de site plusieurs paramètres sont incertains, ceci est dû en général à la qualité des données tirées des tests ou à la variabilité naturelle du sol, verticalement et horizontalement. Notre ignorance du sol est l'incertitude principale, et pour traiter de cet aspect on utilise en général des outils sophistiqués de résolution basés sur les probabilités. Les fonctions de probabilités sont construites sur la base d'informations suffisamment disponibles sur le sol (site). Mais souvent ceci n'est pas le cas. Le volume de sol utilisé pour les essais est généralement inférieur à 1/100.000 du volume total du site (Parsons et al. 2002).

L'un des outils utilisés pour traiter du manque et de l'imprécision de l'information est la théorie des ensembles flous (Zadeh, 1965). Cette théorie permet de considérer les incertitudes en utilisant des variables « qualitatives » exprimées sous forme linguistique

ou avec des valeurs approchées. Les ensembles flous sont différents des ensembles classiques par le fait que leurs éléments appartiennent à l'ensemble avec un degré d'appartenance variant entre zéro et un  $[0,1]$ . Chaque élément peut être exprimé avec une fonction d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale...)

### **3.1 TRAITEMENT DES INCERTITUDES**

Dépendant du type de problème à analyser, les incertitudes y sont étudiées sous différents angles de vue. Dans l'approche que nous proposons les incertitudes y sont plus du fait du manque d'information et de données vagues. L'information qualitative telle que la géologie du site et l'information quantitative obtenue des données préliminaires sont présentes et doivent être prises en considération dans le processus. Le jugement de l'ingénieur sur site est primordial lors de la collecte de l'information.

#### **3.1.1 Introduction**

Les outils statistiques et probabilistes sont souvent utilisés pour considérer les incertitudes mais ils nécessitent d'importantes quantités de données, ce qui n'est pas le cas dans les investigations géotechniques. L'idée est de collecter toute l'information qualitative et quantitative disponible sur le site d'étude. Les cartes géologiques et topographiques, les résultats des sites avoisinants et les visites sur site sont les principaux indicateurs pour un ingénieur pour conduire une investigation géotechnique adéquate. Il a besoin de formuler l'influence de toutes ces informations sur le nombre de sondages à exécuter permettant de connaître au mieux le sol. La combinaison entre une bonne connaissance du site et l'aspect économique est une tâche délicate dans ce cas. Plus important le besoin de connaître le sol plus important sera le coût financier s'y afférant. Et même si le budget pouvait le permettre il y a une limite au-delà de laquelle l'information géotechnique deviendrait redondante et le sol ne pourrait plus supporter les perturbations induites par les trous de forages (sondages).

### **3.2 PARAMETRES INFLUENCANT UNE INVESTIGATION GEOTECHNIQUE**

Les investigations géotechniques sont influencées par nombre de paramètres tels que; la géologie du site, la topographie, le type de projet et les résultats des sites avoisinants.

L'ingénieur lors de la conduite d'une investigation de site possède une information préalable, généralement qualitative. Plus il a de l'information et plus aisée sera l'investigation. L'information sur la géologie et la topographie est donnée sous forme de cartes et par des visites sur site. Le type de projet indique l'importance du chargement auquel sera soumis le sol. Et les résultats de sites avoisinants peuvent aider à avoir une idée plus précise sur le site d'étude et la variabilité des paramètres de résistance du sol. Nous citerons quelques paramètres les plus importants, pouvant avoir de l'influence lors d'une investigation géotechnique.

### **3.2.1 Topographie du site**

Les cartes topographiques et les photographies aériennes sont utiles pour montrer les terrains et les traits géologiques d'un site (failles, cavités...). Lorsqu'elles sont superposées à des cartes géologiques elles peuvent souvent, par interprétation, montrer les structures géologiques de la zone d'étude. Les cartes topographiques fournissent un bon index sur l'estimation de la topographie du terrain, identifient les traits physiques et les structures.

La topographie du site affecte la décision de l'ingénieur quant au nombre de sondages à effectuer durant une investigation géotechnique. Si la topographie indique des terrains escarpés il sera nécessaire d'exécuter un plus grand nombre de sondages que s'il s'agissait d'un site relativement plat. L'information sur la topographie est généralement obtenue à partir des cartes et des visites sur site. L'ingénieur divise le site en zones dont chacune a une certaine pente en moyenne. La pente moyenne globale sur le site peut également être utilisée. Lorsque cette pente est importante un nombre important de sondages devra être effectué pour mieux connaître le sol, car il est plus probable de rencontrer différentes formations et anomalies que si le terrain était plat. Plus importante est la pente et plus grand sera le nombre nécessaire de sondages à accomplir afin de caractériser le site.

### **3.2.2 Géologie du site**

Nous donnons les quelques étapes généralement suivies pour la reconnaissance géologique d'un site.

### ***Cartographie de site***

La détermination des traits du sous-sol se fait en coordonnant des études coopératives entre ingénieurs géotechniciens et géologues. La contribution du géologue se trouve concentrée sur l'origine, la distribution et la manière de dépôt des sols et roches. L'ingénieur géotechnicien détermine en général les propriétés mécaniques du site et les problèmes relatifs aux conditions de constructibilité et d'adaptabilité du sol pour des fondations de projets donnés.

Des cartes géologiques détaillées ou de large échelle doivent être préparées pour les sites d'étude. L'investigation des traits géologiques des matériaux (sol et roche) est essentielle pour la cartographie du site et les investigations qui s'en suivront (géotechnique par exemple).

### ***Reconnaissance de site et observations***

Après une revue complète des données géotechniques disponibles, une reconnaissance géologique sur site doit être effectuée pour rassembler les informations qui peuvent être obtenues sans exploration du sous-sol ou sans étude détaillée. Ceci se fait en vérifiant le contenu des cartes existantes sur terrain, une cartographie superficielle à l'aide de photos aériennes, examen des affleurements naturels et artificiels, ainsi que les cours d'eau traversant la zone pouvant affecter le site.

La nature géologique du sol joue un rôle important dans une investigation de site. Baecher et Christian(2003) se réfèrent à une géologie « locale » et une géologie « régionale ». L'utilisation de cartes géologiques est nécessaire pour avoir une première idée sur les formations géologiques constituant le sol, leurs propriétés, les possibilités de rencontrer des détails géologiques inadéquats ou adverses. Pour les investigations géotechniques Clayton et al. (2005) recommandent d'utiliser des cartes géologiques à une échelle 1/2500.

Plus nous connaissons la géologie et moindre sera le nombre de sondages requis. Si les cartes indiquent des conditions erratiques et une variabilité du sous-sol il sera requis d'effectuer des prospections supplémentaires pour une meilleure caractérisation (FHWA 2002).

D'un autre point de vue, si la géologie n'est pas complexe, seul un nombre modéré de sondages sera nécessaire. Le degré d'information sur la géologie du site est basé sur la précision des cartes et les détails qu'elles fournissent. Si elles indiquent des détails précis sur les couches constituant le sous-sol alors nous avons un degré « élevé » de connaissance (information) géologique. Par contre si les cartes indiquent une information sommaire et faible, alors le degré d'information sur la géologie sera classé « faible » ou « moins important ».

Le degré d'information (connaissance) géologique tel que défini dépend principalement de l'échelle des cartes géologiques utilisées, de la qualité de l'information disponible (sommaire, faible ou précise) et sur le jugement de l'ingénieur sur site. Plus petite est l'échelle plus importants seront les détails qu'on peut obtenir de ces cartes. Les cartes géologiques publiées sont des outils fondamentaux pour l'analyse, cependant des détails supplémentaires doivent toujours être recherchés par des études spécifiques.

Les différents types de cartes publiées, topographiques, géologiques, de ressources minérales, des sols ainsi que des cartes diverses peuvent être utilisées pour obtenir de l'information géologique avant la reconnaissance et l'exploration de site (US Army Corps of Engineers, 2001).

### **3.2.3 Complexité de la géologie locale**

Si les cartes géologiques montrent, pour le site considéré, divers horizons de sol, il faudra effectuer plus de sondages que s'il n'y avait qu'un seul horizon de sol. L'espacement des sondages peut varier d'un site à l'autre et dépend de la géologie de la zone comme nous l'avons déjà mentionné. L'espacement doit être choisi de manière à entrecroiser les différentes caractéristiques du site. Les forages doivent être situés de manière à confirmer la continuité des conditions consistantes du sous-sol (US Corps of Engineers, 1994).

Selon Baecher et Christian (2003), pour d'importants projets, la complexité de la géologie locale nécessite une investigation extensive et requiert une grande quantité d'information. Le degré de complexité de la géologie locale est lié au jugement de l'ingénieur et à l'information disponible sur la diversité et la complexité des formations géologiques du site. Plus complexe est la géologie plus important sera le nombre de sondages requis pour une investigation géotechnique efficace.

### 3.2.4 Conditions géotechniques du terrain

La qualité des conditions géotechniques du sol est un facteur important pour la définition du schéma de sondages à adopter. Lorsqu'elle est disponible, cette information est généralement donnée sous forme de moyenne ou de tendance de la résistance du sol (ou des roches). Plus faible est la qualité des conditions géotechniques, plus important sera le nombre de sondages à exécuter sur site.

Les données disponibles dans la littérature technique sur les paramètres géotechniques des sols seront utilisées pour la classification. Dans notre cas nous utiliserons le module statique du matériau et la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans les différents types de sol.

Le tableau 1 donne des intervalles de valeurs du module statique pour différents types de sols.

Table 3.1 Module statique du sol (d'après Bowles, 1977)

<b>Soil Type</b>	<b>Es (Static Modulus) Kg/cm<sup>2</sup></b>
Clay	
Very soft	3 – 30
Soft	20 – 40
Medium	45 - 90
Hard	70 – 200
Sandy	300 – 425
Glacial Fill	100 – 1600
Loess	150 – 600
Sand	50 – 200
Silty	100 – 250
Loose	500 – 1000
Dense	

Sand and Gravel	
Dense	800 – 2000
Loose	500 – 1400
Shales	1400 – 14000
Silt	20 – 200

Les formations de sol peuvent également être classées en utilisant la vitesse des ondes de cisaillement. D'après Pitilakis(2006) dans divers lieux, où la géologie de surface indique des formations plus résistantes pas plus profondes que 30m, l'information sur la vitesse de cisaillement peut être considérée suffisante à utiliser.

Le sol est classé en cinq (5) ensembles ;

- Roc dur : pour des  $V_s > 1500 \text{ m/sec}$
- Roc :  $760 \text{ m/sec} < V_s \leq 1500 \text{ m/sec}$
- Sol très dense et Roc souple:  $360 \text{ m/sec} < V_s \leq 760 \text{ m/sec}$  with  $N_{\text{SPT}} > 50$ ,  $S_u \geq 100 \text{ kPa}$
- Sol raide:  $180 \text{ m/sec} < V_s \leq 360 \text{ m/sec}$  with  $N_{\text{SPT}} > 50$ ,  $50 \text{ kPa} < S_u < 100 \text{ kPa}$
- Sol mou:  $V_s \leq 180 \text{ m/sec}$

$V_s$  désigne la vitesse des ondes de cisaillement

L'utilisation de ces paramètres ( $E$ ,  $V_s$ ...) est pris comme indication globale sur le site.

Les paramètres de sol varient d'un point à un autre et le sol n'est jamais homogène au sens idéal du terme. Ce qui est suggéré ici est d'utiliser la tendance ou la valeur moyenne d'un paramètre géotechnique dans le but d'avoir une orientation et savoir si un plus grand nombre de sondages ou non sera requis pour identifier au mieux le site.

### 3.2.5 Résultats préliminaires et sites voisins

Une investigation géotechnique est généralement conduite en deux grandes étapes. Dans la première un certain nombre de sondages préliminaires sont exécutés pour guider une caractérisation ultérieure du site en seconde étape. Le nombre de sondages en deuxième étape est généralement plus grand qu'en phase préliminaire. Il n'y a pas d'espacement exact recommandé, du fait que le schéma des forages dépend des conditions

géologiques, de l'aspect géotechnique et du type de projet. Selon (US Corps of Engineers, 1994) le nombre de sondages requis en étape finale pour des projets de murs de soutènement varie de deux (02) à cinq (05) fois le nombre de ceux exécutés en phase préliminaire. Ceci nous informe un peu sur les incertitudes auxquelles l'ingénieur est confronté lorsqu'il s'agit de faire une investigation géotechnique de site.

Les sondages préliminaires indiquent une tendance sur la variabilité du sol. La variabilité horizontale des paramètres de sol influence le nombre de sondages à exécuter. Plus importante est la variabilité, plus grand sera le nombre de sondages à compléter. Des dispersions importantes des paramètres de sol nécessiteront de planifier plus de sondages, sinon un nombre modéré de forages serait suffisant.

La pertinence des résultats de la campagne préliminaire est basée sur le jugement de l'ingénieur. C'est une approche qui reste essentiellement qualitative. La moyenne et l'écart-type des valeurs des paramètres peuvent être utilisés pour quantifier leur dispersion. Cependant, le faible nombre de sondages en phase préliminaire ne permet de faire qu'une évaluation sommaire et l'utilisation de ces résultats servira seulement de support pour guider le jugement de l'ingénieur.

Le même raisonnement est utilisé avec tous les résultats disponibles des sites avoisinants. Ils sont généralement donnés en quelques points autour du site d'étude. Ces résultats sont pratiqués lorsqu'ils sont disponibles. Ils permettent de savoir si le sol du site a des similarités avec les zones du voisinage. Les résultats disponibles de ces zones seront comparés à ceux de l'investigation préliminaire du projet.

Comme il a été noté par Tang(1993) le jugement de l'ingénieur sur l'information est une part importante de l'input dans l'évaluation de la fiabilité d'un site donné. Les résultats des sondages préliminaires seront comparés à ceux disponibles des sites voisins. Si d'importantes dispersions sont observées sur un paramètre du sol, il sera nécessaire de planifier plus de sondages plus tard, autrement un nombre modéré sera suffisant.

### **3.2.6 Type de projet**

Le type de projet indique si un schéma dense de sondages est requis. Pour la même surface et pour différents types de projets, chacun nécessitera un nombre différent de

sondages qui dépendra de l'importance du chargement transmis au sol ; un immeuble à plusieurs étages requiert plus de sondages sur site qu'un simple hall de même aire.

Dans les sites destinés à des structures en zone urbaine (bâtiments, installations industrielles...) il est usuellement requis par les codes d'effectuer des investigations par sondages avec des espacements permettant d'avoir au moins un forage par aire de bâti. La disposition dépend de la configuration de l'ouvrage, et l'espacement est généralement autour de 15 à 30m (Hunt, 2007)

Lorsque certaines zones sont destinées à recevoir un chargement spécifique (machineries par exemple) il sera nécessaire d'y prévoir plus de sondages afin de mieux définir le sol. Dans une étude sur la modélisation adaptative de sol, Schönhardt et Witt(2003) ont décrit la distribution des sondages, dans un site prévu pour un projet industriel, comme étant fonction de l'investigation préliminaire, de la géométrie de l'ouvrage et des zones de chargements spécifiques (machines et autre). Plus la surface spécifique est grande plus important sera le nombre de sondages à y réaliser.

### **3.3 DISPOSITION DES SONDAGES**

La disposition des sondages, l'espacement entre échantillons, et leur profondeur sont contrôlés principalement par la complexité des conditions géologiques, le type de projet et sa taille. Il n'y a pas de règles strictes et précises indiquant le nombre et la profondeur des échantillons pour une investigation géotechnique donnée. Bien qu'une connaissance considérable des conditions géologiques peut être obtenue des études préliminaires, d'une revue de la littérature technique, des cartes, des photographies et de la reconnaissance du site, l'investigation géotechnique reste fréquemment une opération de type « apprendre sur le tas (*US Army Corps of Engineers, 2001*). L'ingénieur est, cependant, rappelé que chaque forage et programme de sondages doivent être planifiés et exécutés en fonction de contraintes financières avec une considération appropriée pour d'autres variables pouvant affecter l'investigation de site.

La plupart des investigations géotechniques sont incluses dans l'une des catégories suivantes, ou d'une combinaison, dépendant de la taille de l'ouvrage.

- a- Les petites structures isolées, telles que les maisons. Un seul sondage pourrait suffire, notamment si un nombre de petites structures sont placées proches les unes les autres et la géologie ne varie pas de manière significative dans le site.
- b- Les projets compacts tels que les bâtiments et les glissements de terrains. Les forages peuvent être relativement profonds et rapprochés entre eux.
- c- Les grands projets tels que les autoroutes, les pistes d'aéroports, les pipelines, les lignes à haute tension et les réservoirs. Exception faite des réservoirs, les espacements entre sondages peuvent être relativement larges et la profondeur superficielle. L'espacement et la fréquence des sondages doivent être jugés selon la variabilité du site. Pour les réservoirs, les profondeurs peuvent être considérables pour définir les limites du sol imperméable.

En 1949 Hvorslev a suggéré les considérations générales suivantes pour le planning d'une investigation de sous-sol, nous reprenons son commentaire.

« Les sondages devraient être étendus à des couches ayant une capacité portante adéquate et doivent traverser tous les dépôts de faibles caractéristiques -- remblais non-consolidés, tourbe, limon organique et argile molle et compressible. Les couches faibles devraient être sondées même si elles sont couvertes par des couches de bonne capacité portante. Lorsque des structures sont prévues sur de l'argile et autres matériaux ayant une résistance adéquate mais susceptibles de se consolider par accroissement de charge, les sondages devraient traverser les couches compressibles ou être prolongés jusqu'à une profondeur de manière à réduire le surplus de contraintes à des valeurs qui n'influent pas sur les tassements des structures proposées.

En dehors des cas de structures à chargements très importants ou d'infiltration d'eau ou sous d'autres considérations, les sondages peuvent être stoppés lorsque le rock est atteint ou après une courte pénétration dans une couche ayant une capacité portante exceptionnelle. Si la structure devrait être fondée sur de la roche, il faudra vérifier qu'effectivement le substratum soit atteint et non seulement quelques passages résistants ou durs et il est recommandable qu'un sondage ou plus soit enfoncé loin dans la roche solide de 10 à 20 pieds afin de déterminer l'étendue et le caractère de la zone traversée.

Dans les régions où du rock ou des couches de capacité portante exceptionnelles sont rencontrés à des profondeurs relativement faible (de 100 à 150pieds) il serait recommandable de continuer au moins un des sondages à l'intérieur de telles couches. L'information additionnelle à obtenir constituerait une assurance en cas de développements imprévus.

Les exigences sur la profondeur devraient être reconsidérées lorsque des résultats de sondages préliminaires sont disponibles, et il est souvent possible de réduire la profondeur des sondages suivants ou parfois de confiner l'exploration à des zones particulières. »

Les sondages préliminaires d'exploration devraient fournir des échantillons presque continus pour la classification et l'enregistrement des données. Cependant le planning doit être flexible de manière à obtenir des échantillons pour des essais spécifiques et pouvoir suivre les changements de stratification et les anomalies éventuelles dans le sol. L'ingénieur se base aussi sur le jugement qui pourrait lui suggérer de modifier le plan d'investigation pour obtenir une information plus complète et étendue sur les conditions du site. Ces changements de programme peuvent concerner la profondeur des sondages, leur nombre ainsi que l'espacement, en fonction des conditions de sous-sol rencontrées.

Un guide préliminaire pour le planning d'un programme de sondages et d'échantillons a été présenté par (US Corps of Engineers, 2001). Ce programme n'est pas un règlement rigide pour les investigations géotechniques. Il est suggéré simplement comme un guide pour une planification préliminaire du programme de sondages et d'échantillons. Le programme final doit être suffisamment flexible pour permettre à l'ingénieur d'obtenir une compréhension globale du site, incluant les anomalies et d'autres traits lorsqu'on opère sous des contraintes de budget et de temps.

Ce guide fournit également à l'ingénieur une orientation sur les diamètres appropriés des échantillons destinés à différents essais de laboratoire.

### ***Résumé***

Nous avons présenté dans cette partie les facteurs importants pouvant affecter une investigation géotechnique de site, il s'agit de facteurs liés principalement à la géologie

et à la variabilité des propriétés du sol. D'autres facteurs peuvent être ajoutés tels, l'influence de la nappe phréatique, la présence d'anomalies, cavités...etc.

Comment pourrions-nous adapter ces facteurs avec l'information qualitative et quantitative qu'ils peuvent contenir pour construire un système d'aide à la décision qui permettrait d'estimer le nombre optimal de sondages sur site, et ainsi s'assurer d'une bonne investigation géotechnique?

Depuis leur développement par Zadeh en 1965, les ensembles flous ont été et sont encore utilisés dans l'ingénierie pour résoudre des problèmes traitant d'incertitudes et de manque d'information. L'approche que nous nous proposons de développer dans ce travail est basée sur un raisonnement utilisant un système d'inférence floue qui prend en compte l'information des différents facteurs que nous avons cités auparavant, et permet d'estimer un nombre optimal de sondages requis pour caractériser au mieux un site.

En considérant ces facteurs comme des paramètres d'entrée, nous cherchons à prendre en considération l'influence de chaque paramètre sur la densité des sondages à compléter sur site. Le problème de base étant de formuler ces paramètres de manière à ce qu'ils soient utilisables par un ingénieur géotechnicien sur site.

### **3.4 INTRODUCTION AUX ENSEMBLES FLOUS ET AU RAISONNEMENT FLOU**

Zadeh (1965) lorsqu'il a formulé pour la première fois ce qui sera connu comme les Ensembles Flous, leur a donné la définition suivante ;

*Un ensemble flou est une classe d'objets avec un continuum de degrés d'appartenance. Cet ensemble est caractérisé par une fonction d'appartenance qui assigne à chaque objet un degré d'appartenance allant de zéro à un.*

A la différence de la logique binaire, la logique floue utilise la notion d'appartenance. La logique floue est plus adaptée pour la représentation de données imprécises et de concepts basés sur l'intuition, telle la description linguistique humaine ; par exemple les expressions *approximativement, bon, grand*

L'ensemble conventionnel ou binaire peut être traité comme un cas spécial du concept d'ensemble flou. Un ensemble flou est uniquement déterminé par sa fonction

d'appartenance, et il est aussi associé avec un terme linguistiquement significatif (Du & Swamy, 2006).

La logique floue fournit un cadre systématique permettant d'incorporer l'expérience humaine. Elle est basée sur trois concepts fondamentaux ; les ensembles flous, les variables linguistiques et les distributions de possibilité. Un ensemble flou est un moyen effectif pour représenter des variables linguistiques. Une variable linguistique est une variable dont la valeur peut être décrite qualitativement en utilisant une expression linguistique et quantitativement en utilisant une fonction d'appartenance. Les expressions linguistiques sont utiles pour les concepts de communication et de savoir.

Les premières applications de la logique floues l'ont été dans les systèmes de contrôle. Dans les systèmes de contrôle flous le savoir humain est codifié par des règles linguistiques de type IF-THEN, qui permettent de construire un système d'inférence flou. Un modèle exact n'est pas nécessaire pour la conception d'un contrôleur.

Les ensembles flous ont trouvé des applications dans divers domaines de l'ingénierie, et leur utilisation a pris de plus en plus de place, notamment en géotechnique pour la classification des sols et des roches (Huang et Siller, 1997), l'estimation des propriétés des roches, analyse des glissements de terrains (Giasi et al., 2003), calcul des tassements et dans la recherche des valeurs caractéristiques de sol (Boissier 2000, Chuang 1995, Fetz et al. 1999, Hu 2003, Nawari 2000...). On le retrouve aussi dans les problèmes de choix de systèmes de réparation des constructions en béton (Gajzler, 2004) et dans bien d'autres applications très diverses en génie civil.

Nous projetons d'utiliser le raisonnement flou dans l'estimation du nombre optimal de points de reconnaissance (sondages) nécessaires à une investigation de site. Pour construire ce type de système d'aide à la décision nous aurons besoin d'exprimer les paramètres d'entrée (input) et de sortie (output) comme des ensembles flous.

Dans la section qui suit nous présentons les ensembles flous avec leurs différentes propriétés.

### 3.4.1 Définition des ensembles flous

Comme nous l'avons mentionné auparavant un ensemble flou diffère d'un ensemble classique (binaire) par le concept de degré d'appartenance. Supposons que l'on s'intéresse à la taille des hommes. Si par exemple « grand » est défini comme l'ensemble des tailles égales ou plus grandes que 183cm. Au sens binaire du terme un individu de taille 1m80 ne serait pas pris dans l'ensemble « grand » dans ce cas. Mais si nous posons la question de savoir si la personne est « presque » 183cm de taille nous ne saurons répondre. L'incertitude dans ce cas est due à l'imprécision, ou à l'ambiguïté de l'adjectif « presque ». Un individu de 180cm peut clairement faire partie de l'ensemble « presque 183cm de taille ».

La notion d'appartenance à un ensemble est centrale pour la représentation des objets dans un univers. Les ensembles classiques contiennent des objets qui satisfont des propriétés précises d'appartenance ; les ensembles flous contiennent des objets qui satisfont des propriétés imprécises d'appartenance. Par exemple l'ensemble des tailles de 1.50m à 2m est net (figure 3.1) tandis que l'ensemble des tailles dans la région « presque 1.83m » est flou (figure 3.2).

Considérons une collection exhaustive d'éléments individuels (singletons)  $x$  qui constituent un univers de discours (information)  $X$ . Plus loin, plusieurs combinaisons de ces éléments individuels composent des ensembles de l'univers  $A$  par exemple. Pour les ensembles nets un élément  $x$  dans l'univers  $X$  est soit membre de  $A$  ou non. Mathématiquement ceci est représenté par une fonction indicatrice où ;

$$\chi_A(x) = 1, \text{ si } x \in A$$

$$\chi_A(x) = 0, \text{ si } x \notin A$$

$\chi_A(x)$  indique une appartenance non ambiguë d'un élément  $x$  à l'ensemble  $A$ .

Pour notre exemple de l'univers des tailles d'individus, on suppose  $A$  l'ensemble net de tous les individus avec  $1.5 < x < 2m$ , comme montré sur la figure 3.1.

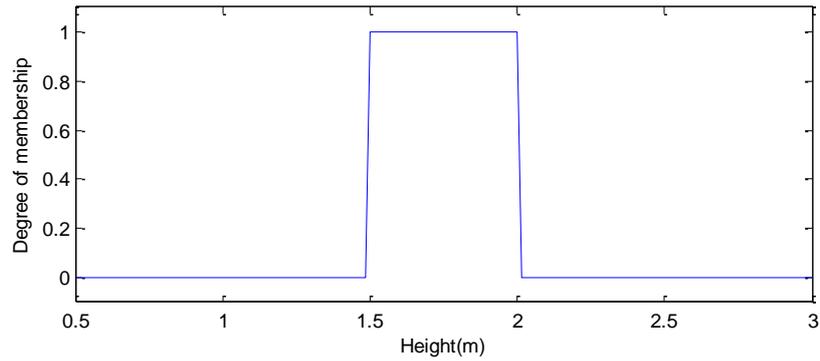


Fig. 3.1 Ensemble net A (Classique) des individus de taille 1.5 à 2m

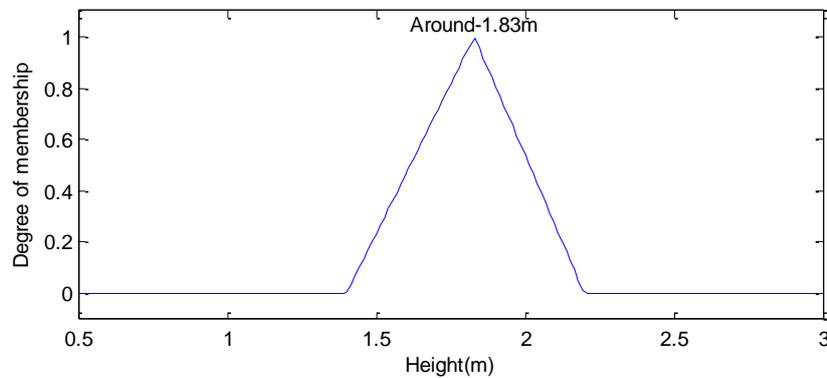


Fig. 3.2 Ensemble flou des individus de taille « autour de 1.83m »

Un individu particulier,  $x_1$ , a une taille de 1.7m. L'appartenance de cet individu à l'ensemble net A est égale à 1, une appartenance complète. Prenons un autre individu  $x_1$ , ayant une taille de 1.49m. L'appartenance de cette personne à l'ensemble A est égale à 0 dans ce cas, c'est une non-appartenance comme le montre la figure 3.1. Dans ces situations, l'appartenance à l'ensemble est binaire : un élément est soit membre de l'ensemble ou ne l'est pas.

Zadeh(1965) a étendu la notion d'appartenance binaire pour adapter plusieurs « degrés d'appartenance » sur l'intervalle continu réel  $[0,1]$ , où les points d'extrémités 0 et 1 indiquent respectivement la non-appartenance et l'appartenance totale, comme c'est le cas pour les ensembles nets. Mais le nombre infini de valeurs entre ces points d'extrémités représentent divers degrés d'appartenance d'un élément  $x$  pour quelque

ensemble de l'univers. Les ensembles dans l'univers  $X$  qui contiennent des « degrés d'appartenance » sont appelés par Zadeh « les ensembles flous ».

Si on reprend l'exemple précédent, considérons un ensemble  $H$  consistant en des tailles « autour » de 1.83m (figure 3.2). Comme la propriété « autour de 1.83m » est floue, il n'y a pas une fonction d'appartenance unique, c'est l'analyste qui décide le type de fonction d'appartenance à prendre.

Une différence essentielle entre les ensembles nets et les ensembles flous est leur fonction d'appartenance. Dans l'ensemble net la fonction d'appartenance est unique, tandis que dans l'ensemble flou il y a une infinité de fonction d'appartenance pour le représenter. Pour les ensembles flous l'unicité est sacrifiée mais il y a gain en flexibilité parce que la fonction peut être ajustée pour maximiser l'utilité pour une application particulière.

Dans les ensembles classiques (nets), la transition pour un élément dans un univers entre l'appartenance et la non- appartenance est abrupte et bien définie (d'où le terme "net"). Pour un élément dans un univers contenant des ensembles flous cette transition peut être graduelle, parmi divers degrés d'appartenance, se conformant au fait que les limites des ensembles flous sont vagues et ambiguës. D'où l'appartenance à l'ensemble flou qui se mesure par une fonction qui essaiera de décrire l'ambiguïté et l'imprécision (Ross et al., 2002).

### **3.4.2 Formulation mathématique des ensembles flous**

Un ensemble flou est une paire  $(A, m)$  où  $A$  est l'ensemble et  $m: A \rightarrow [0,1]$ .

Pour chaque  $x \in A$ ,  $m(x)$  est appelé le degré d'appartenance de  $x$  à  $(A, m)$ . Pour un ensemble fini  $A = \{x_1, \dots, x_n\}$ , l'ensemble flou  $(A, m)$  est souvent noté par  $\{m(x_1) / x_1, \dots, m(x_n) / x_n\}$ .

Un exemple d'ensemble flou est donné en figure 3.3, représentant «la consistance d'un sol » qui dépend de la densité relative  $Dr(\%)$ . La variable linguistique est l'ensemble des termes « Very-loose, très lâche », « Average-Dense, Moyennement Dense »... qui sont utilisés pour définir la consistance du sol basée sur un ensemble référence qui contient toutes les valeurs possibles de  $Dr$ .

Prenons par exemple  $Dr=60\%$  ; la consistance du sol est donnée par le degré d'appartenance  $\mu=0.45$  à « Dense » et  $\mu=0.58$  à l'élément « Average-Dense, Moyennement Dense ».

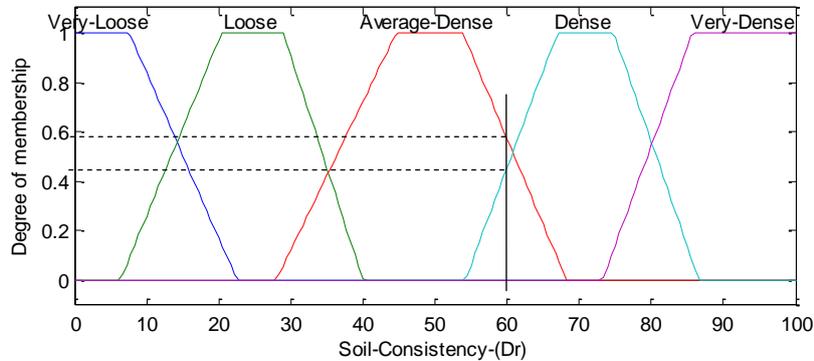


Fig 3.3 Ensemble flou « Consistance de sol »

Les fonctions d'appartenance peuvent avoir plusieurs formes, triangulaire, trapézoïdale, Gaussienne...etc, la figure 3.4 montre que l'on peut exprimer l'ensemble flou « consistance d'un sol » en utilisant différents types de fonctions d'appartenance.

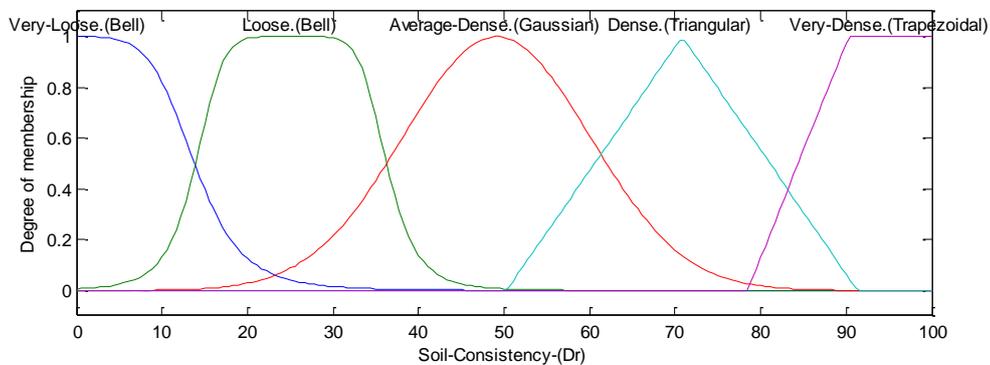


Figure 3.4 Autres types de fonctions d'appartenance

### 3.4.3 Règles floues

Les êtres humains prennent des décisions basées sur des règles. Toutes les décisions que nous prenons sont basées sur des assertions du genre SI-ALORS (If - Then). **Si** le temps est clair **Alors** vous décidez de sortir. **Si** les prévisions indiquent que le temps sera mauvais aujourd'hui, mais bon demain, **alors** nous prenons la décision de ne pas

partir aujourd'hui **et** reporter la visite à demain. Les règles associent des idées et relient un événement à l'autre.

Une règle floue est définie comme une assertion conditionnelle de forme :

**SI** x est A

**ALORS** y est B

Où x et y sont des variables linguistiques ; A et B sont des valeurs linguistiques déterminées par des ensembles flous sur les univers de discours X et Y, respectivement.

Les règles sont aussi exprimées usuellement dans d'autres formes telles que :

**SI** variable-1 EST ensemble-flou-d'entrée-1 **ET** variable-2 EST ensemble-flou-d'entrée-2

**ALORS** l'action EST ensemble-flou-sortie.

La partie SI est appelée «antécédent» et la partie ALORS est appelée « conséquent ». Les deux variables d'entrée sont « variable-1 » et « variable-2 ». Elles ont des valeurs définies en ensembles flous. La variable de sortie « action » est elle aussi définie par des ensembles flous.

Une assertion de type «classique » SI-ALORS utilise la logique binaire, par exemple ;

SI « taille de l'homme » est >180cm

ALORS le poids de l'homme est >50kg

Les règles « classiques » sont exprimées en Logique Booléenne. D'un autre coté les règles floues sont à plusieurs valeurs. En règles floues, l'univers du discours de la variable « taille de l'homme » est un ensemble flou (« grand », « moyen », « petit ») et la règle floue serait :

SI « taille de l'homme » est « grand »

ALORS « le poids de l'homme » est « lourd »

Nous introduisons les règles floues pour leur importance dans la construction du système d'inférence floue pour les investigations géotechniques.

Nous avons mentionné dans la section précédente un ensemble de paramètres qui influencent les investigations géotechniques en général. Chacun de ces facteurs a une influence sur le nombre de sondages à compléter sur site, et ils obéissent au schéma de règles SI-ALORS.

Par exemple ;

*SI «la géologie du site» est « Bien connue » ALORS « Pas nécessaire d'exécuter un nombre important de sondages »*

*SI «la variabilité du sol» est «Importante» ALORS « Effectuer un nombre important de sondages »*

L'utilisation de la logique floue devient très appropriée dans ce cas, elle permet de prendre en considération les différents paramètres qui s'expriment linguistiquement.

En vue de l'estimation du nombre de sondages nécessaires pour une bonne caractérisation géotechnique de site, les ensembles d'entrée seront construits sur la base de tous les paramètres disponibles (Géologie, Variabilité du sol...) et qui peuvent affecter l'investigation géotechnique. L'ensemble de sortie sera exprimé en termes de densité de sondages à exécuter.

L'idée principale étant d'exprimer chacun des paramètres sous forme d'ensembles flous et construire un système de règles floues permettant d'avoir une sortie de type « densité de sondages » requis pour le site.

En gros le schéma du Système d'Inférence Floue sera constitué d'un nombre d'ensembles flous ENTREE (Paramètres du site) reliés par l'intermédiaire de règles floues à des ensembles flous SORTIE (exprimant la densité de sondages sur site).

### **3.5 CONSTRUCTION DES ENSEMBLES FLOUS POUR INVESTIGATION GEOTECHNIQUE**

Les principaux facteurs à prendre en compte pour une caractérisation de site sont:

- La géologie (disponibilité de cartes locales et régionales)

- La complexité des conditions de géologie locale (basée sur l'information disponible que l'ingénieur juge complexe selon les anomalies présentes et la diversité des formations du sol).
- La topographie du site. Les cartes topographiques lorsqu'elles sont superposées à des cartes géologiques peuvent souvent, par interprétation, montrer les structures géologiques du site. Les cartes topographiques fournissent un bon index du relief dans le site, permettent d'estimer sa topographie, identifient les traits physiques et les structures.
- Le type de projet. Des types de projets différents nécessiteront différents nombre de sondages sur site, dépendant de leur taille, rôle et importance des charges qu'ils induisent sur le site. Plus important est le projet plus grand sera le nombre de sondages à effectuer en vue de caractériser le sol.
- Les résultats préliminaires, qui donnent une indication sommaire sur la variabilité du sol, sont très utiles pour l'ingénieur dans la prise de décision sur les étapes suivantes d'investigation géotechnique. Si les résultats préliminaires indiquent une forte variabilité des paramètres du sol il sera nécessaire de conduire un nombre important de sondages dans les étapes suivantes d'investigation.
- Lorsqu'elles sont disponibles, la moyenne et la tendance globale des valeurs des paramètres de sol sont utiles à l'ingénieur pour la conduite de l'investigation du sol. La densité des sondages dans cas va dépendre de la qualité des conditions géotechniques du milieu. Plus faible (mou) est le sol, plus important sera le nombre de forages pour la caractérisation. Le module statique du matériau peut être utilisé comme référence ou indication, tout comme la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol.

La question est de savoir comment pouvoir exprimer tous ces paramètres sous forme d'ensembles flous ?

### **3.6 CLASSIFICATION DES PARAMETRES D'ENTRÉE**

#### ***3.6.1 L'ensemble flou "Topographie du site"***

La topographie est généralement exprimée en termes d'angle de pente moyen sur site. Plus la pente est raide plus complexe sera la caractérisation du site d'où le besoin d'effectuer un nombre important de sondages. Lorsque la (les) pente(s) est raide il est plus probable de rencontrer des formes complexes de couches de sol. La construction de l'ensemble flou dans ce cas dépendra des cartes topographiques disponibles sur le site. « Faible », « Relativement moyenne », « Moyenne », « Importante » et « Très importante pente » sont les variables linguistiques que nous utilisons pour l'ensemble flou. Pour des pentes faibles le nombre de sondages sera « petit », tandis que si l'angle de pente est important nous aurons besoin d'exécuter un nombre important de sondages pour identifier au mieux le site.

Les données disponibles et le jugement de l'ingénieur indiqueront les limites à assigner aux variables floues de cet ensemble. Kanungo et al.(2006) dans une étude sur les glissements de terrain, ont classé les pentes d'un site en cinq (05) intervalles. Un indice a été attribué pour chaque intervalle. Nous avons résumé cette classification pour l'utiliser dans le cadre de notre étude. Les pentes allant de 0° à 15° sont considérées dans l'ensemble flou comme étant de «faible pente », de 15 à 25° « Pente relativement moyenne », de 25 à 35° « Pente moyenne », entre 35° et 45° « Pente importante » et les pentes supérieures à 45° sont considérées « Très importantes ». Les fonctions d'appartenance utilisées sont de type triangulaire et trapézoïdal tel que l'indique la figure 3.5.

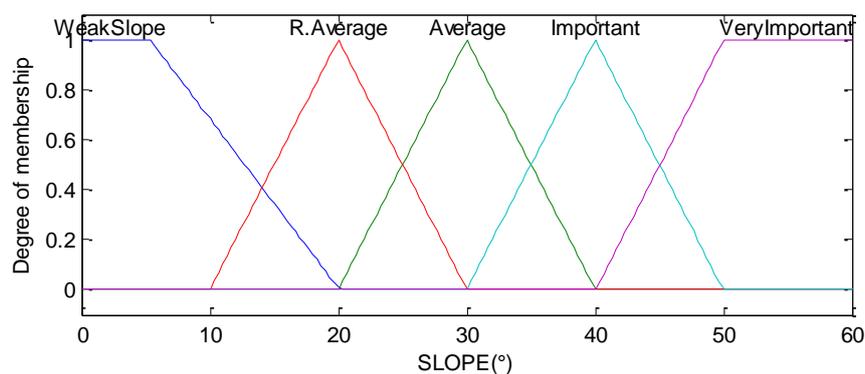


Fig 3.5 Topographie du site

La pente du site va affecter notre décision quant au nombre requis de sondages à faire. Plus importante est la pente, plus grande sera la densité des sondages à effectuer pour caractériser le site.

### ***3.6.2 L'ensemble flou "Géologie du site"***

La nature géologique du sol joue un rôle important dans l'investigation géotechnique d'un site. La nature géologique peut avoir plusieurs paramètres. Baecher et Christian (2003) se réfèrent à deux sortes de géologies, l'une dite « locale » et la seconde dite « régionale ». L'utilisation de cartes géologiques est plus que nécessaire pour avoir une première idée sur les formations constituant le sol du site d'étude, leur propriétés ainsi que les possibilités de rencontrer des détails (traits) géologiques inadéquats ou adverses.

L'information disponible sur la géologie locale et régionale peut être assemblée et exprimée comme étant un « degré de savoir (information) ». Les cartes géologiques sont d'un grand intérêt pour définir ce « degré de savoir » sur la géologie, et leurs échelles jouent un rôle important. Pour les investigations géotechniques l'échelle adéquate des cartes géologiques est de 1/2500 telle que recommandé par Clayton et al.(2005). Avec des cartes géologiques à cette échelle le « degré de d'information (savoir) » est jugé « bon ».

D'autres considérations peuvent être rajoutées pour mieux évaluer le degré d'information, comme les visites sur site ; ceci dépend généralement du jugement de l'ingénieur. L'ensemble flou sera construit alors en utilisant les labels linguistiques « faible » degré d'information sur la géologie, « moyen » et « bon ». Chacun de ces labels linguistiques est relié à un intervalle de valeur sur une échelle variant de 1 à 100%.

Plus nous avons d'information sur la géologie, moindre sera le nombre de sondages nécessaires pour l'investigation géotechnique. Si les cartes indiquent une variabilité importante et des conditions de sous-sol erratiques alors un grand nombre de sondages sera requis pour une bonne caractérisation du site (FHWA, 2002). D'un autre côté si la géologie n'est pas « complexe » seul un nombre modéré de forages sera indispensable.

Le degré d'information géologique tel que défini dépend de la précision et des détails contenus dans les cartes. Lorsque celles-ci contiennent beaucoup de détails et sont précises alors nous avons une « bonne » connaissance de la géologie du site. Par contre si elles donnent seulement une information générale et approximative, le « degré d'information » sera jugé moins important. Une carte à une échelle 1/2500 fournit un degré d'information « adéquat », tandis qu'une carte géologique à 1/30000 n'offre pas suffisamment d'information pour une investigation géotechnique et de ce fait un degré d'information « faible ».

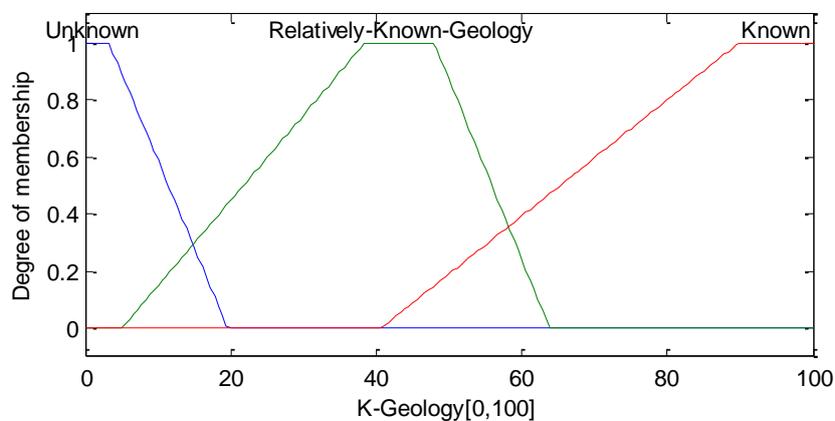


Fig 3.6 Ensemble flou « Géologie – Degré d'information »

Comme nous l'avons souligné auparavant ce degré d'information géologique, tel que défini, dépend essentiellement de l'échelle des cartes géologiques utilisées (disponibles), de la qualité de l'information (grossière ou détaillée) ainsi que du jugement de l'ingénieur sur site. Les cartes géologiques éditées sont des outils fondamentaux pour tout type d'analyse ; cependant des études spécifiques sont nécessaires pour révéler plus de détails du site. Le degré d'information est étalé sur une échelle de 1 à 100% qui indique le niveau d'information sur l'aspect géologique de la zone d'étude.

### 3.6.3 L'ensemble flou "Complexité de la géologie locale"

La superposition de cartes topographiques et géologiques peut aider à reconnaître et définir de nouveaux traits sur site. Cela permet aussi de juger de la complexité de la géologie locale lorsque des anomalies sont présentes ou lorsque les formations

géologiques sont complexes notamment avec d'importantes et d'erratiques variations des propriétés du sol.

La construction d'un ensemble flou relatif à la « Complexité de la géologie locale » dépend de toute l'information rassemblée disponible, en jugeant de la complexité des conditions géologiques selon les cartes et les résultats éventuels sur le site d'étude. Cet ensemble est divisé en quatre attributs linguistiques tels que ; « Faible complexité », « Complexité relative », « Complexe » et « Très complexe ».

Si les cartes géologiques montrent, pour le site considéré, différents horizons de sol, il sera nécessaire de faire plus de sondages que s'il y avait un seul horizon. C'est un exemple de « géologie locale complexe ». L'espacement entre points de forage dépend donc de la géologie de la zone et peut varier d'un site à un autre. L'espacement doit être choisi de manière à pouvoir intersecter les caractéristiques géologiques distinctes du sol. Les sondages doivent être situés en des endroits de manière à confirmer les changements significatifs des conditions de sous-sol, aussi bien qu'une continuité apparente de ces conditions (US corps of Engineers 1994).

Selon Baecher et Christian (2003) pour des projets importants la complexité de la géologie locale nécessite une investigation extensive et requiert une importante quantité d'information sur le sous-sol. Le « degré de complexité » de la géologie locale est relié au jugement de l'ingénieur et à la disponibilité de l'information sur la diversité et la complexité des formations géologiques du site.

L'ensemble flou "Complexité de la géologie locale" reflète la complexité de la géologie locale du site. Exprimé en « degré de complexité » il varie entre 1 et 100% avec les attributs linguistiques, « Faible complexité », « complexité moyenne », « Complexe » et « Très complexe ». Les fonctions d'appartenance et les limites des variables sont données dans la figure suivante (Fig 3.7).

Parmi les règles floues associées à cet ensemble, certaines s'expriment de la forme ;

SI « Faible complexité » de la géologie locale ALORS « Nombre faible » de Sondages.

SI Géologie locale « Très complexe » ALORS « Nombre Important » de Sondages.

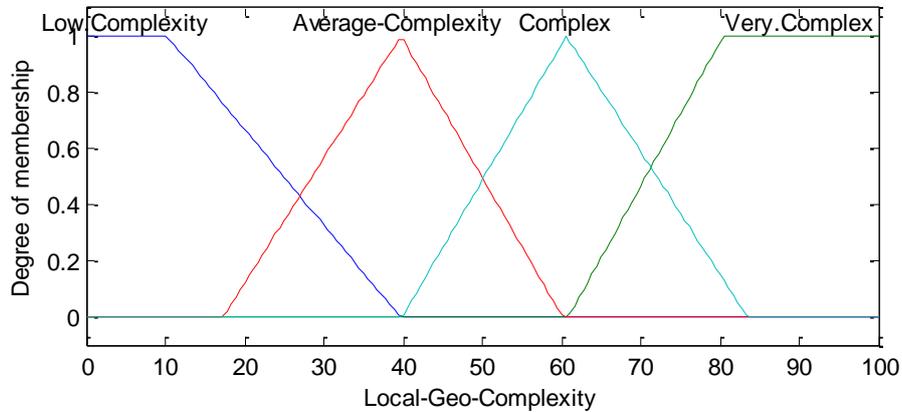


Fig 3.7 Ensemble flou « Complexité de la géologie locale »

### 3.6.4 L'ensemble flou "conditions géotechniques du sol"

Parfois une tendance des paramètres géotechniques du site est donnée sous forme de valeur moyenne en quelques points. Cette information même sommaire (grossière) peut être exploitée et utilisée comme aide à la décision pour l'ingénieur. Ces paramètres géotechniques sont généralement donnés par le Module Statique du matériau ou la Vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol. Plus faible est le sol et plus important sera le nombre de sondages à y effectuer en vue d'une bonne investigation du site.

La qualité des conditions géotechniques du sol est un facteur important dans la disposition et le nombre de sondages. Lorsqu'elle est disponible cette information est donnée sous forme de moyenne de la résistance du sol.

Pour la classification de l'ensemble flou « Paramètres géotechniques » nous avons utilisé des données tirées de la littérature technique, que ce soit pour le module statique ou la vitesse de propagation des ondes de cisaillement. L'ensemble flou basé sur le module statique est donné en figure 3.8.

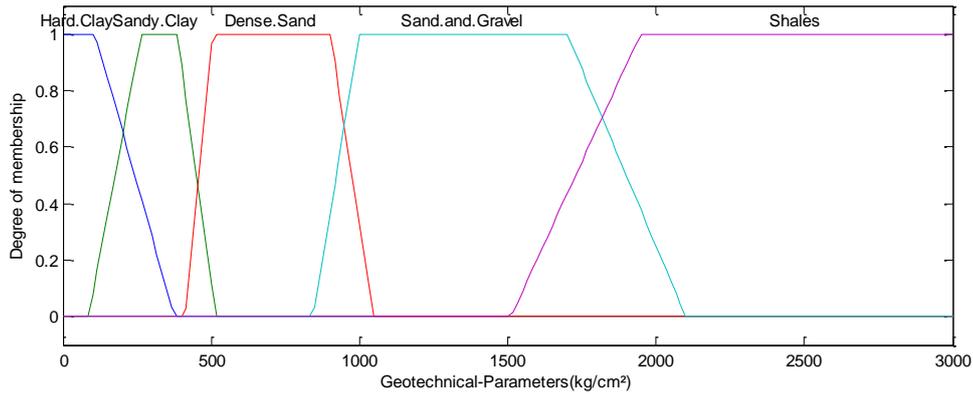


Fig 3.8 Paramètres géotechniques ((kg/cm<sup>2</sup>))

Les formations du sol peuvent être classées aussi sur la base de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement. Selon Pitilakis (2006) dans la plupart des cas, lorsque la géologie de surface indique des formations raides pas plus profondes que 30m, la connaissance de la vitesse des ondes cisaillement y est considérée comme information suffisante. L'ensemble flou est donné tel que indiqué en figure 3.9.

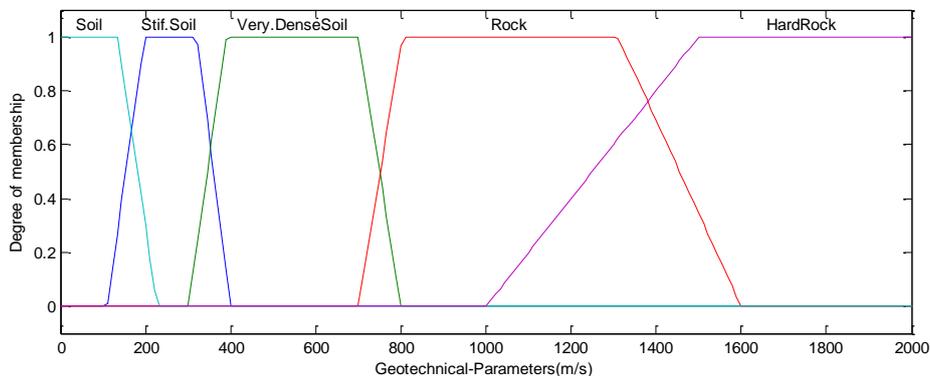


Fig 3.9 Paramètres géotechniques (Vitesse des ondes de cisaillement - m/s)

### 3.6.5 Les ensembles flous sur « les résultats préliminaires » et les « sites voisins »

Les investigations géotechniques sont généralement conduites en deux étapes, une première dite « préliminaire » utilisant peu de sondages pour avoir une idée grossière sur le sol constituant le site, ainsi qu'une seconde étape basée sur les résultats de la première. Dans la deuxième phase un nombre optimal de sondages est nécessaire mais il n'y a pas de règles précises pour estimer ce nombre. Les résultats des sondages préliminaires sont utilisés pour guider la suite de l'investigation géotechnique subséquente. Le nombre de sondages en deuxième phase doit être supérieur à celui de

l'investigation préliminaire. Il n'y a pas d'espacement requis, du moment que la disposition des forages est contrôlée aussi par les conditions géologiques, l'aspect géotechnique ainsi que le type de projet.

Les systèmes d'inférence floue offrent la possibilité de prendre en considération les incertitudes et permettent d'intégrer l'influence des paramètres de site sur l'investigation. Le nombre de sondages en deuxième étape dépend, comme on vient de le mentionner, des résultats de l'investigation préliminaire. Les sondages préliminaires indiquent une tendance de la variabilité du sol. Plus significative est la variabilité du sol, plus important sera le nombre de trous de forages à exécuter pour une meilleure caractérisation du site. Des dispersions significatives des paramètres de sol nécessiteront de planifier plus de sondages ; autrement un nombre modéré de sondages serait suffisant.

L'ensemble flou « Variabilité des paramètres de sol » est construit en fonction des résultats préliminaires et dépend principalement de l'appréciation et du jugement de l'ingénieur. Trois intervalles moyens sont proposés pour les variables linguistiques « Variabilité faible », « Variabilité moyenne » et « Variabilité importante ». On peut ajouter et raffiner l'ensemble flou par d'autres attributs linguistiques, cela dépend de la qualité et de la disponibilité de l'information préliminaire.

La pertinence des résultats de la campagne préliminaire est basée sur le jugement de l'ingénieur. C'est une approche qui reste essentiellement qualitative. La moyenne et l'écart-type peuvent être utilisés pour quantifier la dispersion des paramètres de sol. Cependant du fait que le nombre de sondages préliminaire est faible, cette approche sera utilisée uniquement comme un outil d'aide pour guider l'ingénieur dans son jugement.

Le même raisonnement est utilisé avec tous les résultats disponibles des sites avoisinants. Selon Tang(1993) l'information critique est une part majeure dans l'input sur l'évaluation de la fiabilité sur un site donné. Les résultats des sites voisins sont généralement donnés en quelques points autour du site d'étude. Ces résultats sont pratiques lorsqu'ils sont disponibles. Ils permettent de savoir si le sol du site a des similarités avec les zones du voisinage. Les résultats disponibles de ces zones seront comparés à ceux de l'investigation préliminaire du projet.

La figure 3.10 montre l'ensemble flou exprimant le jugement de l'ingénieur sur la similarité entre les résultats (préliminaires), nous avons utilisé une échelle de 1 à 100%.

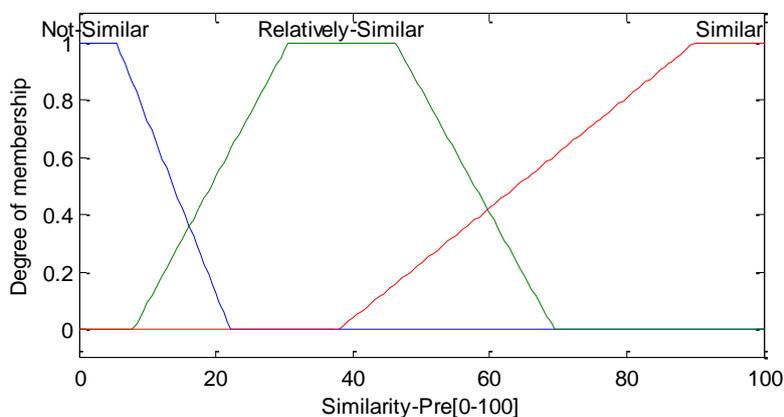


Fig 3.10 Ensemble flou, Similarité des résultats préliminaires

### 3.6.6 L'ensemble flou "type de projet"

L'importance du type de projet donne une orientation sur la manière de caractériser le site. Le type de projet indique si un schéma dense ou non de sondages est requis. Un projet important induira un chargement et des contraintes grands dans le site, d'où une disposition dense des sondages à effectuer. Pour la même surface par exemple, deux types de projets nécessiteront des dispositions différentes de sondages selon l'importance du chargement qu'ils transmettent au sol. Un immeuble à plusieurs étages requiert plus de sondages sur site qu'un simple hall de même aire.

Pour la construction de l'ensemble flou, nous proposons trois attributs linguistiques définissant l'importance du projet à construire, « Petit », « Moyen » et « Important ». Ces attributs sont basés sur l'importance du chargement transmis au sol ainsi que de la surface occupée.

Dans les sites destinés à des structures en zone urbaine (bâtiments, installations industrielles...) il est usuellement requis par les codes d'effectuer des investigations par sondages avec des espacements permettant d'avoir au moins un forage par aire de bâti. La disposition dépend de la configuration de l'ouvrage, et l'espacement est généralement autour de 15 à 30m (Hunt, 2007)

Les éléments de l'ensemble flou sont donc exprimés en ; « Important », « Moyen » et « Faible » selon le chargement induit pas la taille du projet, tel que indiqué en figure 3.11.

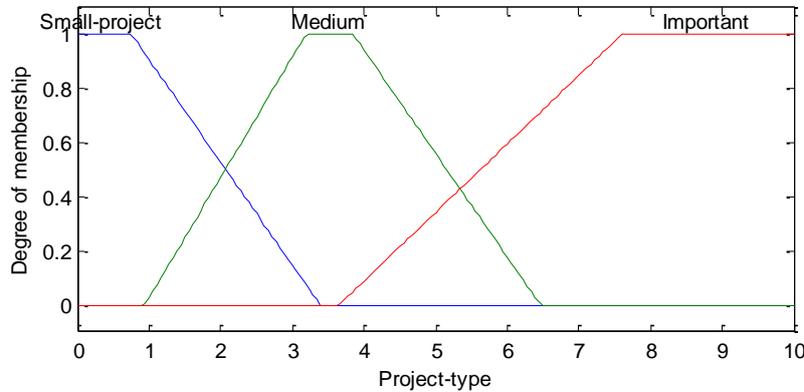


Fig 3.11 Ensemble flou « Type de projet »

Lorsque certaines zones sont destinées à recevoir un chargement spécifique (machineries par exemple) il sera nécessaire d'y prévoir plus de sondages afin de mieux définir le sol. Dans une étude sur la modélisation adaptative de sol, Schönhardt et Witt(2003) ont décrit la distribution des sondages, dans un site prévu pour un projet industriel, comme étant fonction de l'investigation préliminaire, de la géométrie de l'ouvrage et des zones de chargements spécifiques (machines et autre).

Les fonctions d'appartenance de cet ensemble flou dépendent du rapport entre la surface spécifique de chargement (machines...) et la surface totale du projet (emprise). Plus la surface spécifique est grande plus important sera le nombre de sondages à y réaliser. La figure 3.12 illustre l'ensemble flou en question.

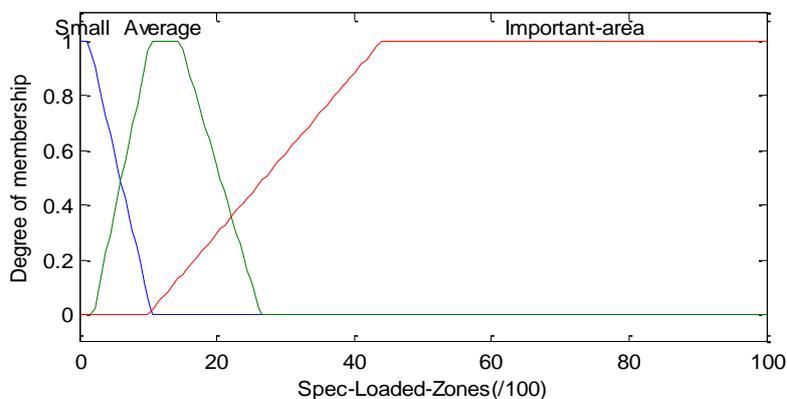


Fig 3.12 Ensemble flou « Zones de chargements spécifiques »

### 3.6.7 L'ensemble flou « Sortie - Output »

L'ensemble flou de sortie est défini par les attributs linguistiques "Faible", "Moyenne" et "Importante" densité de sondages. Leurs fonctions d'appartenance sont triangulaires et trapézoïdale telles que montrées en figure 3.13.

Dans la construction d'un ensemble flou, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer les fonctions d'appartenance. Parmi ces méthodes, quelques unes sont basées sur des questionnaires utilisés par des spécialistes. Chameau et Santamarina(1987) ont fait une étude comparative sur les méthodes d'évaluation des ensembles flous, telles ; la méthode Point Assessment, Interval Assessment, Membership Function Exemplification et la méthode Pair wise Comparison. Selon les auteurs la méthode Interval Assessment semble avoir nombre d'avantages pratiques pour l'application.

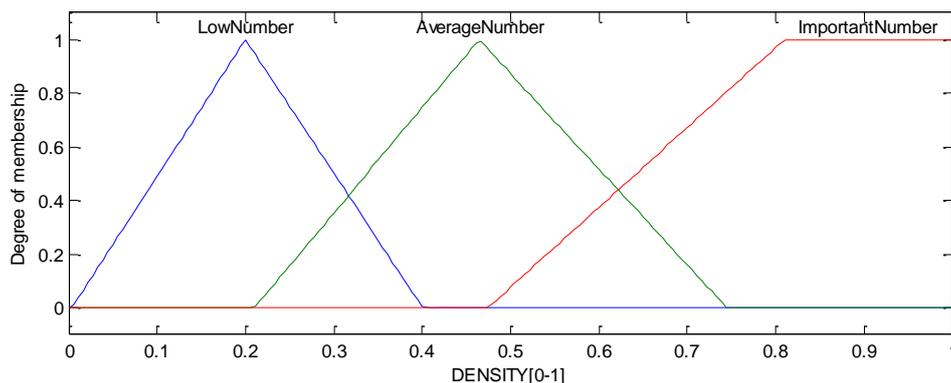


Fig 3.13 Ensemble flou « Densité de sondages »

## CONCLUSION

Les paramètres essentiels qui influencent une investigation géotechnique ont été présentés. Les plus importants de notre point de vue sont ; la géologie, le type de projet, les paramètres géotechniques du sol ainsi que les résultats préliminaires d'investigation. Ces facteurs affectent de manière significative le nombre de sondages à exécuter pour une caractérisation géotechnique de site.

La technique des ensembles flous est utile lorsqu'il s'agit de traiter le caractère vague et le manque d'information que l'on rencontre lors d'une investigation géotechnique. Une introduction a été faite expliquant le concept d'ensemble flou et la différence qu'il y a avec un ensemble classique (net).

Nous avons décrit les différents paramètres et la manière de les exprimer sous forme d'ensembles flous. Le système d'aide à la décision à construire est structuré en Input et Output. Dans l'Input nous retrouvons les facteurs qui ont de l'influence sur l'investigation tels que la géologie, la topographie ...etc, et en Output on exprime la densité des sondages sur site. La densité se traduit par un poids entre 0 et 1.

# **CHAPITRE 4**

# 4

## CONSTRUCTION D'UN SYSTEME D'INFERENCE FLOU ET APPLICATION EN INVESTIGATION GEOTECHNIQUE

### INTRODUCTION

Les systèmes d'inférence floue furent étendus avec le développement du raisonnement flou. La logique floue (Zadeh, 1973) a émergé comme une conséquence de la théorie des ensembles flous (Zadeh, 1965). En 1973 Zadeh a introduit les règles composées pour inférence et quelques années après il a proposé la théorie du raisonnement approximatif. Cette théorie fournit un cadre puissant pour le raisonnement en face d'informations imprécises et incertaines (Fuller, 2003).

Les systèmes d'inférence sont généralement des combinaisons de paramètres d'entrée et de sortie avec des connections spécifiques entre eux. Avec le raisonnement flou les connections sont exprimées sous forme de règles de la forme SI X ALORS Y. avec X appartenant à l'entrée (Input) et Y un élément de la sortie (output).

Santamarina et Chameau (1987) ont discuté des systèmes experts en géotechnique, ils ont donné l'exemple d'une approche pour système basé sur les connaissances à utiliser dans le cas de la sélection du type approprié de pieux de fondations. Ils ont présenté un système expert permettant de prendre en considération les incertitudes lors de la sélection d'un type de pieu pour fondation. Un ensemble de conditions initiales permet de faire des inférences pour choisir la meilleure solution parmi plusieurs alternatives.

Les systèmes d'inférence floue travaillent sur le même schéma de fonctionnement. Un schéma généralement composé d'un ensemble de conditions d'entrée permettant de

faire des inférences en utilisant des règles basées sur l'utilisation de variables linguistiques et de décider sur les paramètres de sortie.

Lorsque plusieurs paramètres existent dans l'Input et qu'ils ont tous une influence sur le choix des ensembles de sortie (output) on peut estimer le poids de la décision en se basant sur la contribution de chaque élément. Dans notre cas les paramètres d'entrée sont divers tels que, la géologie, la topographie, le type de projet...Chacun d'eux a son propre rôle avec un certain degré d'influence sur la sortie (output). La sortie est assumée comme la densité de sondages à réaliser sur site permettant de caractériser au mieux le sol.

Le système d'inférence floue que nous nous proposons de construire est destiné à fournir à l'ingénieur une orientation sous forme de poids de décision sur la densité des sondages lors d'une investigation géotechnique de site. La densité en question est traduite en nombre en se basant sur les recommandations des codes, particulièrement l'Eurocode7( 1996).

#### **4.1 INFERENCE FLOUE**

Un modèle d'inférence floue est généralement basé sur les trois étapes fondamentales suivantes (Saboya et al., 2006) :

- Sélection des variables d'entrée (Input) et de sortie (output).
- Description des règles de relations floues entre l'Input et l'Output.
- Défuzzification, qui consiste en la transformation des variables linguistiques floues de sortie en valeurs.

Babuska (in Saboya et al., 2006) considère les phases suivantes pour la construction d'un modèle de logique floue.

- Dans l'étape de fuzzification, les valeurs numériques d'entrée des différents paramètres sont traduites en termes linguistiques, avec les degrés d'appartenance correspondants.
- Dans l'étape dite "du degré d'accomplissement », les degrés d'appartenance des différentes variables seront combinés avec des opérateurs logiques (ET, OU, NON) pour donner le degré d'accomplissement d'entrée de la règle en question.

- Dans l'étape d'inférence, l'ensemble flou de sortie de chaque règle est modifié en utilisant le degré d'accomplissement de la règle. Cette étape représente l'implication SI-ALORS du modèle. Plusieurs modèles d'inférence existent, par exemple Min-Max ou Max-Pro. Le modèle Min-Max de Mamdani est généralement le plus utilisé.
- L'étape agrégation, combinant les différents résultats des ensembles flous de sortie en un seul ensemble flou.
- La defuzzification qui consiste à convertir l'ensemble flou résultant (sortie) en une valeur finie.

Dans le problème considéré plusieurs ensembles d'entrée (Input) du système sont pris en considération dont, la nature géologique du site, la topographie, le type de projets, la variabilité des conditions de sol ...etc. quand aux ensembles de sortie ils s'expriment sous la forme de densité de sondages sur site (Faible, Moyenne, Importante).

Les règles floues du système à mettre en œuvre s'expriment de la forme ;

SI X est A ALORS Y est B.

Avec A ensemble d'entrée, et B ensemble de sortie. Ces règles seront exécutées en parallèle durant le processus d'inférence. Un exemple de règle floue pourrait s'exprimer comme suit :

SI Géologie « Relativement connue » ALORS « Modérer le nombre de sondages sur site ».

La sélection adéquate des éléments d'entrée est fondamentale. Ces éléments s'expriment sous forme linguistique ou qualitative dans notre cas, exemple de la géologie du site. Lorsque la géologie est « connue » par exemple, quel serait le degré de connaissance (information) géologique à lui attribuer ? La collection de l'information (savoir) est une part difficile dans le développement d'un système d'inférence. Santamarina et Chameau (1989) ont noté que l'information à incorporer dans un système d'aide à la décision est d'une importance capitale pour qu'il soit viable.

## **4.2 OPERATIONS SUR LES ENSEMBLES FLOUS**

Les opérations les plus connues sur les ensembles flous sont l'intersection et l'union. L'intersection de deux ensembles flous A et B est un ensemble flou  $C = A \cap B$

correspondant au minimum de la fonction d'appartenance  $\mu_C = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$ , tandis que l'union correspond au maximum de la fonction d'appartenance  $\mu_C = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$ , avec  $\mu_A(x)$ ,  $\mu_B(x)$  respectivement les fonctions d'appartenance de A et de B.

Soient A et B des sous-ensembles flous d'un ensemble fini X,

L'intersection de A et de B est définie comme ;

$$(A \cap B)(t) = \min\{A(t), B(t)\}, \forall t \in X$$

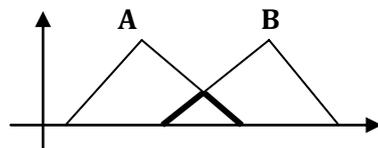


Fig 4.1 Intersection de deux nombres flous A,B

L'union de A et de B est définie comme;

$$(A \cup B)(t) = \max\{A(t), B(t)\}, \forall t \in X$$

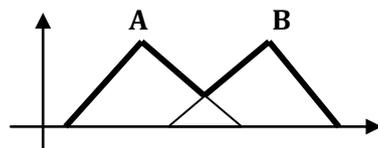


Fig 4.2 Union de deux nombres flous A,B

Le complément d'un ensemble flou a est défini comme ;

$$(-A)(t) = 1 - A(t), \forall t \in X$$

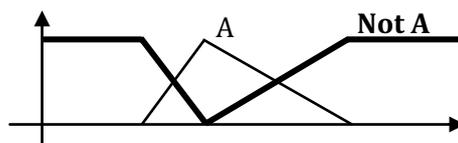


Fig 4.3 A et son complément

L'interprétation d'un système de règles de type SI-ALORS implique deux étapes distinctes. La première concerne l'évaluation de l'antécédent, impliquant la fuzzification de l'entrée et l'application d'un quelconque opérateur flou nécessaire. La deuxième étape est l'implication, ou l'application du résultat de l'antécédent au conséquent, qui essentiellement évalue la fonction d'appartenance.

En logique classique (utilisant des ensembles nets) une règle est déclenchée si la prémisse est exactement la même que l'antécédent de la règle, et le résultat d'un tel déclenchement est le conséquent actuel de la règle en question.

En logique floue, une règle est déclenchée tant que le degré de similitude est différent de zéro entre la prémisse et l'antécédent de la règle. Pour la plupart des applications, la fonction d'appartenance pour une relation donnée est obtenue avec l'implication minimum ou produit données comme suit :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \mu_B(x)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

C'est Mamdani (1977) qui, le premier, a proposé l'implication minimum (fig 4.4), ensuite Larsen (1980) proposa l'implication produit. Ces implications d'inférence, n'ont rien à voir avec la logique prépositionnelle traditionnelle ; de là elles sont citées comme implications dans l'ingénierie.

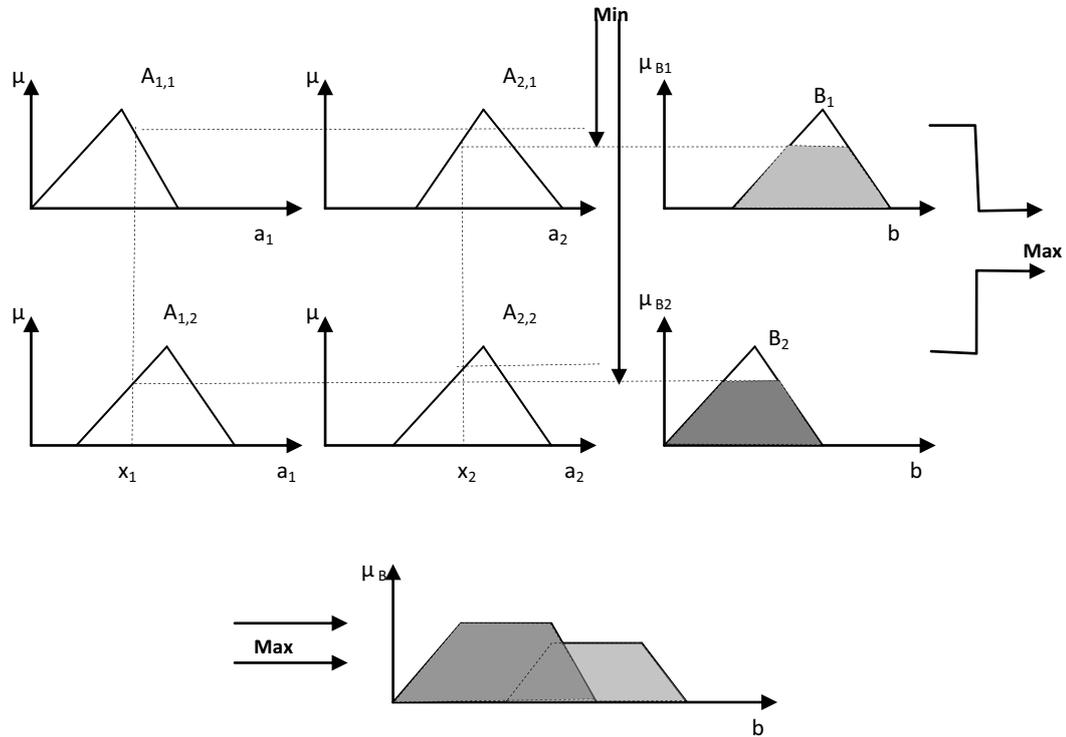


Fig 4.4 Stratégie d'une inférence de type Mamdani

### 4.3 SYSTEME D'INFERENCE FLOU

Les systèmes d'inférence flou consistent en des règles de type SI-ALORS qui spécifient des relations entre les ensembles flous d'entrée (Input) et de sortie (output). Les relations floues présentent un degré de présence ou d'absence d'association ou d'interaction entre les éléments de deux ensembles flous ou plus. Soit,  $U$  et  $V$  deux univers de discours. Une relation floue est un ensemble flou de l'espace « produit » et est caractérisé par la fonction d'appartenance  $\mu_R(x,y)$ , où  $x \in U$ , et  $y \in V$  et les valeurs de  $\mu_R(x,y)$  sont comprises dans l'intervalle  $[0,1]$ . Les relations floues jouent un rôle important dans les systèmes d'inférence flou. La logique floue utilise des notions de logique classique. Les concepts empruntés sont utilisés en remplaçant les valeurs 0 et 1 par des valeurs de fonctions d'appartenance.

Un système d'inférence flou définit essentiellement une cartographie non-linéaire du vecteur de données de l'input en un scalaire de sortie (output), en utilisant des règles

flous. Le processus implique des fonctions d'appartenance d'entrée/sortie, des opérateurs flous, des règles flous SI-ALORS, l'agrégation des ensembles de sortie et la défuzzification.

Un modèle général de système d'inférence floue est illustré dans la figure 4.5. La base des règles contient des règles linguistiques que des experts mettent en place. Il est possible également d'extraire des règles à partir de données numériques. Une fois les règles établies, le système d'inférence floue peut être regardé comme un système qui permet de transformer un vecteur d'entrée (Input) en un vecteur de sortie (Output). Le fuzzificateur permet de transformer des nombres (des entrées) en fonctions d'appartenance correspondantes. Ceci est requis pour pouvoir activer les règles exprimées en termes de variables linguistiques.

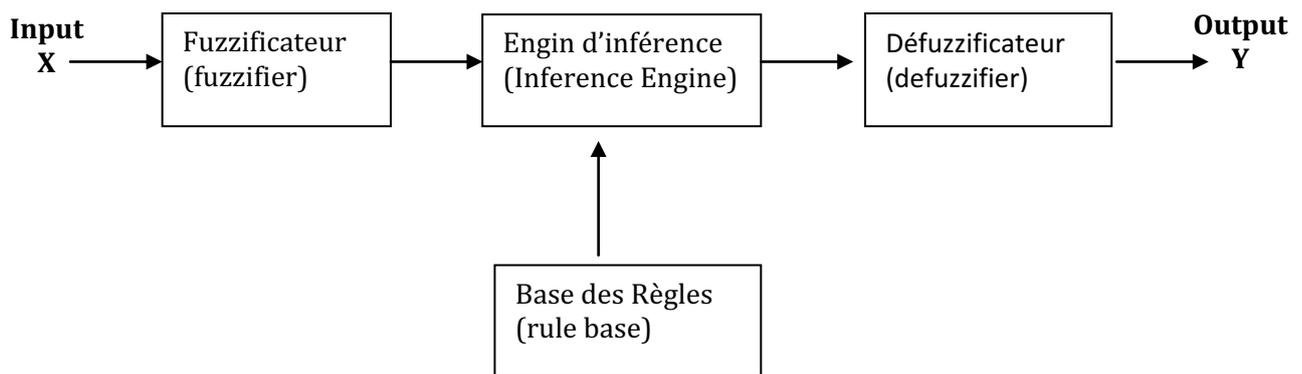


Fig 4.5 Modèle général de système d'inférence floue

La figure suivante illustre un exemple de transformation d'ensembles d'entrée (un seul ensemble flou) en une sortie (ensemble flou également) en exécutant certaines règles à différent degrés d'appartenance.

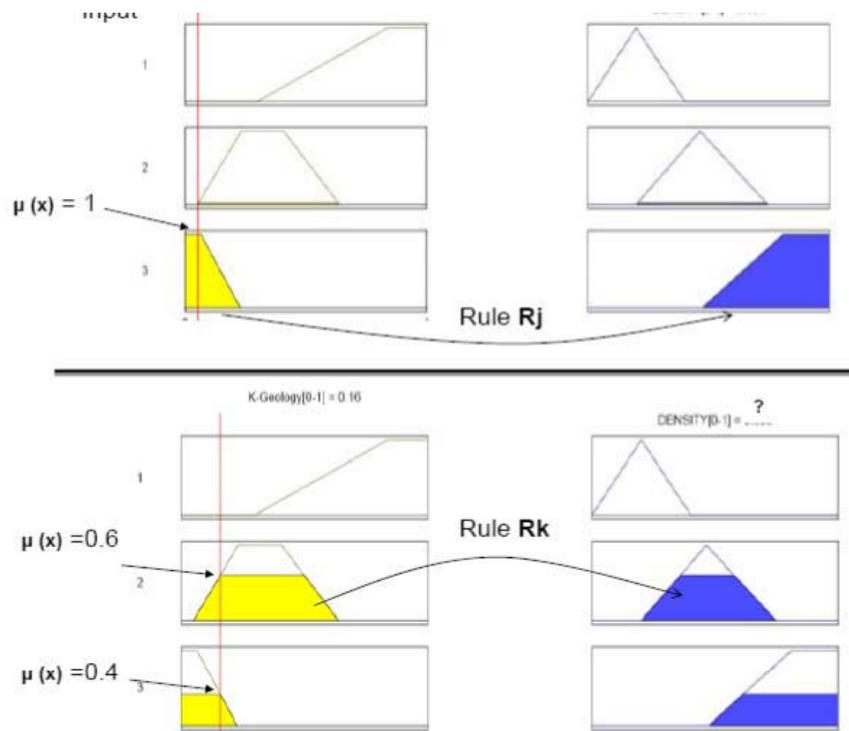


Fig 4.6 Exemple de transformation d'ensemble flou d'entrée en ensemble de sortie (Output)

Les règles floues sont enclenchées en parallèle, ce qui est un des aspects les plus importants des systèmes d'inférence floue. L'ordre dans lequel les règles sont déclenchées n'affecte pas les résultats à la sortie (output). Le défuzzificateur transforme les ensembles flous de sortie en un nombre fini. Pour un ensemble flou englobant une plage de valeurs de sortie, le défuzzificateur permet d'avoir un seul nombre, donc passer d'un ensemble flou vers un nombre fini (net).

### 4.3.1 Défuzzification

Un système d'inférence floue transforme un vecteur d'entrée en une valeur nette à la sortie. Pour obtenir cette valeur à la sortie, nous aurons besoin d'un processus dit de défuzzification. L'entrée dans le processus de défuzzification est un ensemble flou (l'ensemble combiné de sortie), et la sortie est un nombre unique. Plusieurs techniques de défuzzification ont été proposées. La plus utilisée reste la méthode centroïde. Dans cette méthode le défuzzificateur détermine le centre de gravité de l'ensemble de sortie et utilise la valeur obtenue comme étant la sortie du système d'inférence floue. Pour un ensemble B obtenu de l'agrégation (combinaison) et continu le centroid est donné par :

$$Y = \frac{\int_S y_i \mu_B(y) dy}{\int_S \mu_B(y) dy}$$

Dans la figure qui suit est illustré un exemple simple de defuzzification, un seul ensemble flou d'entrée (K-Geology) pour un ensemble de sortie (Density). Le résultat final est donné sous forme de centre de gravité après agrégation et défuzzification.

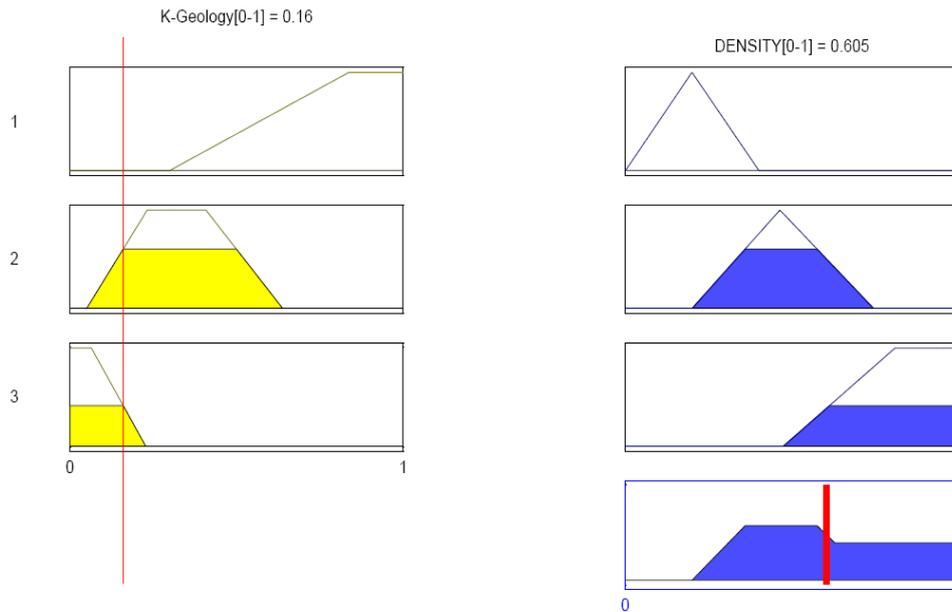


Fig 4.7 Exemple de transformation de sortie par defuzzification (méthode du centre de gravité)

#### 4.4 APPLICATION EN INVESTIGATION GEOTECHNIQUE

Comme nous l'avons mentionné auparavant les paramètres influençant la densité de sondages pour une investigation géotechnique sont ;

- La géologie du site d'étude
- La complexité de la géologie locale
- La topographie du site
- Le type de projet à construire
- Les résultats préliminaires (obtenus des sondages préliminaires en général)
- D'éventuels résultats de sites voisins.

Ces paramètres sont considérés comme ensembles d'entrée, chacun avec une influence particulière sur la densité des sondages sur site. L'ensemble flou de sortie à considérer est la densité des sondages à effectuer sur site. La figure 4.8 montre le principe de fonctionnement du système d'inférence floue à construire.

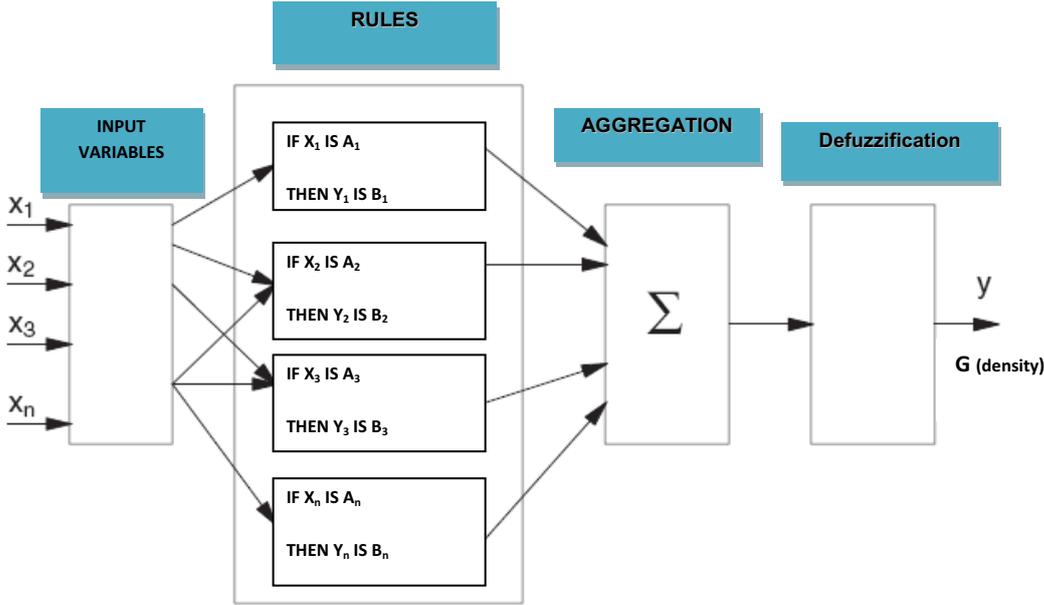


Fig 4.8 Schéma de principe d'un système d'inférence floue.

Les ensembles flous d'entrée du système d'inférence pour investigation géotechnique ont été présentés dans le chapitre précédent, nous en reproduisons les allures dans les figures qui suivent:

- Topography

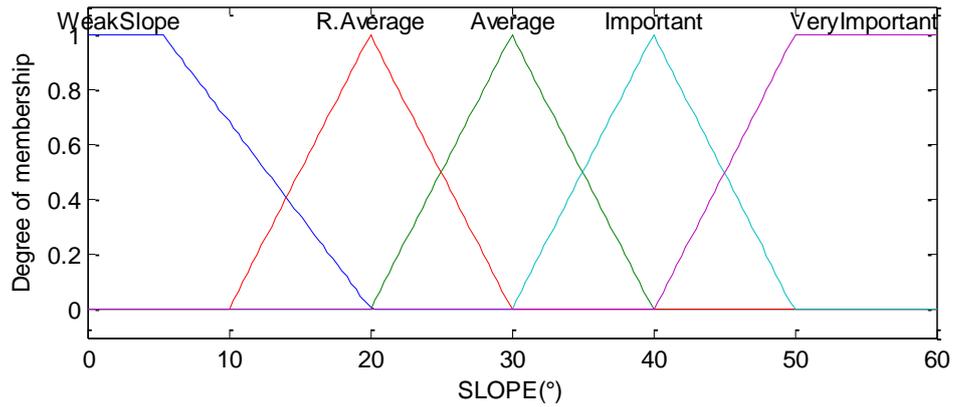


Fig 4.9 Ensemble flou Topographie du site

- Géologie (degré d'information géologique)

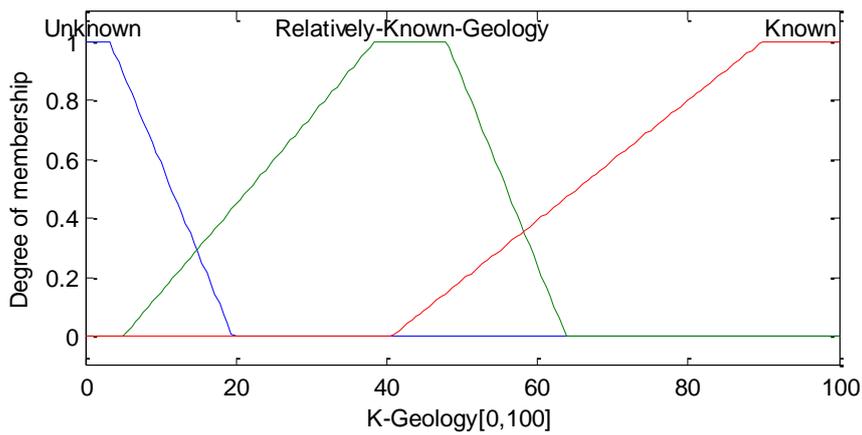


Fig 4.10 Géologie – degré d'information

- L'autre ensemble relatif à la géologie est pris comme étant la complexité de la géologie locale, comme indiqué dans la figure qui suit.

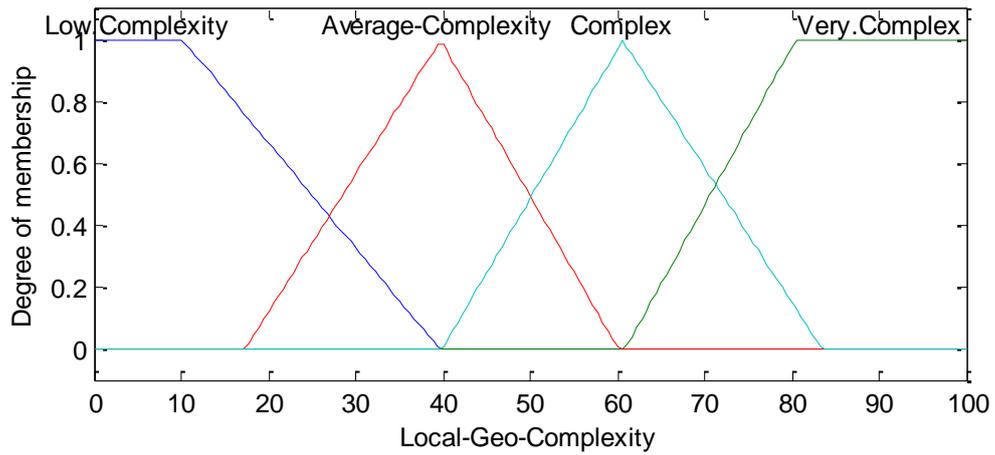


Fig 4.11 Degré de complexité de la géologie locale

- Les paramètres géotechniques, indiquent la tendance en terme de résistance des formations de sol sous-jacent

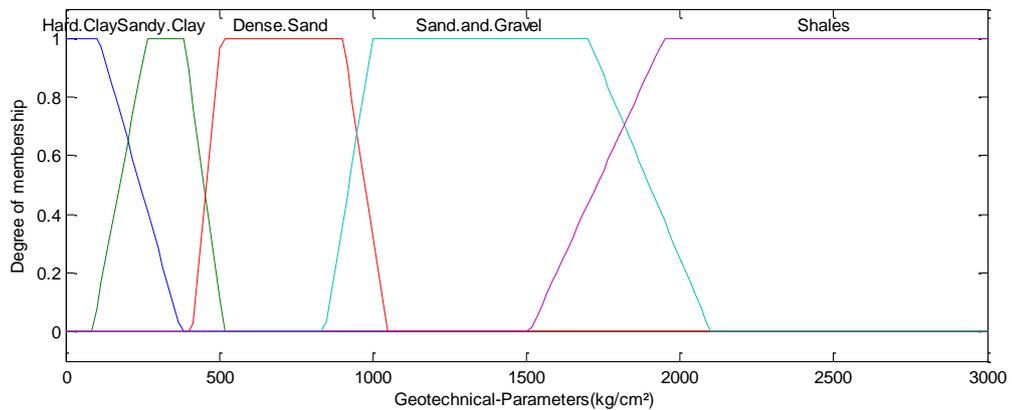


Fig 4.12 Paramètres géotechniques selon le module du sol

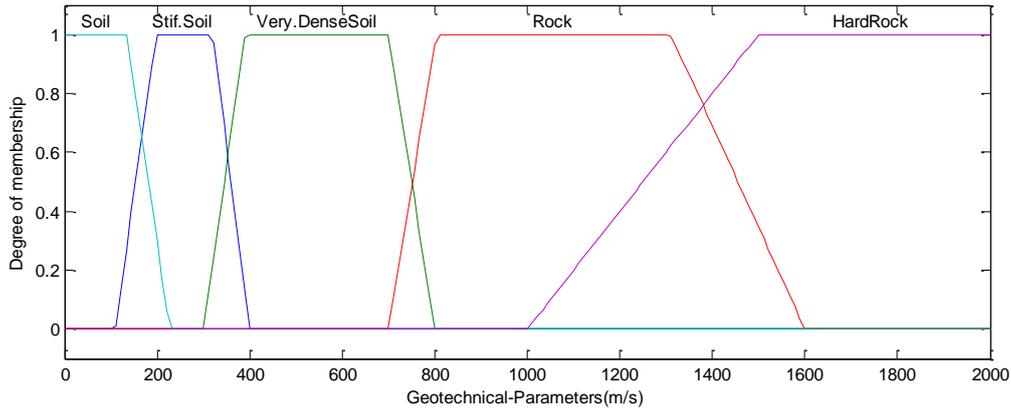


Fig 4.13 Paramètres géotechniques selon la vitesse de propagation des ondes de cisaillement.

- La similarité entre les résultats de l'investigation préliminaire que l'on peut exprimer comme la variabilité des paramètres de sol est donnée par l'ensemble flou de la figure suivante :

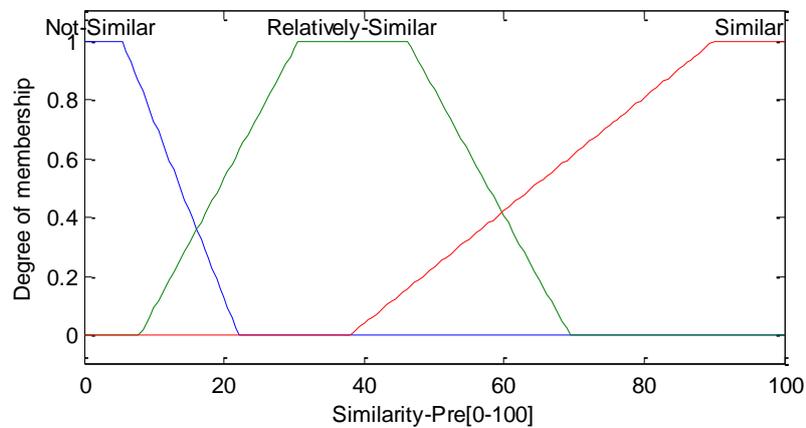


Fig 4.14 Similarité des résultats préliminaires (Variabilité des paramètres de résistance du sol)

- Le type de projet dépend de l'importance des charges que l'ouvrage transmet au sol.

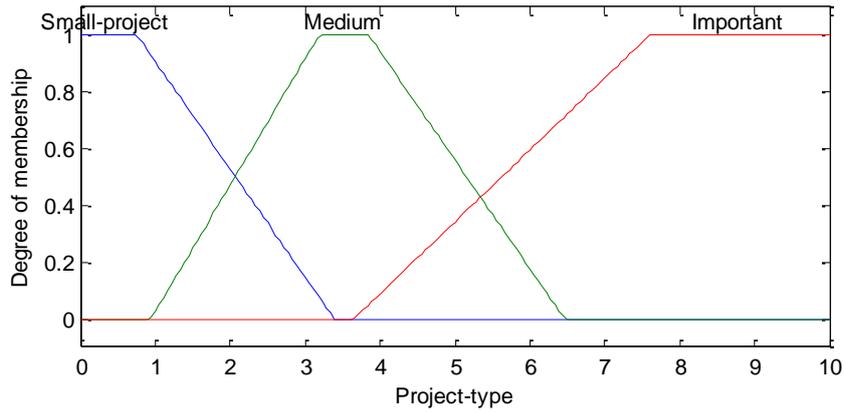


Fig 4.15 Le type de projet comme ensemble flou

- Les zones de chargement spécifique sont représentées en terme de pourcentage de surface chargée par rapport à la surface global du projet (machines par exemple)

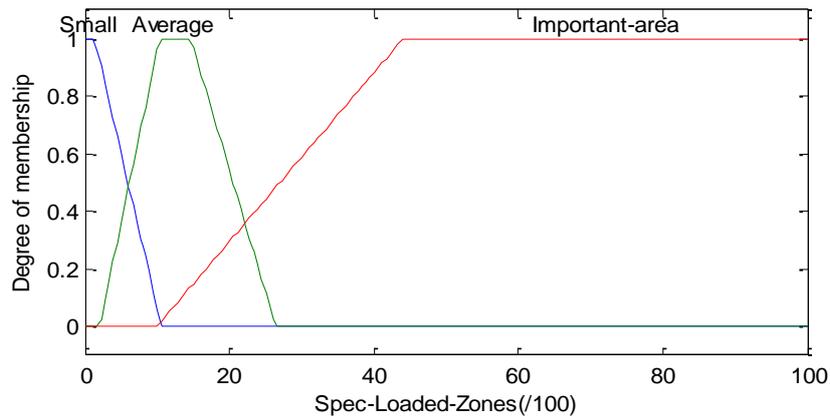


Fig 4.16 l'ensemble flou « zones de chargement spécifiques »

Tous ces ensembles feront partie des conditions d'entrée (Input) du système. Chacun d'eux influence la densité de sondages nécessaires à une bonne caractérisation du site. L'ensemble de sortie (output) est exprimé en termes de densité de sondages, un nombre variant entre [0, 1].

La figure suivante représente cet ensemble de sortie, exprimant trois situations de densité de sondages, « faible », « moyenne » et « importante ».

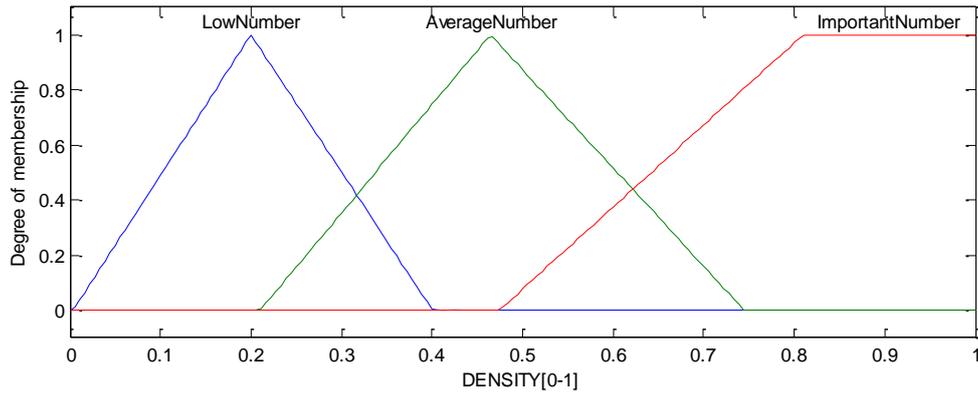
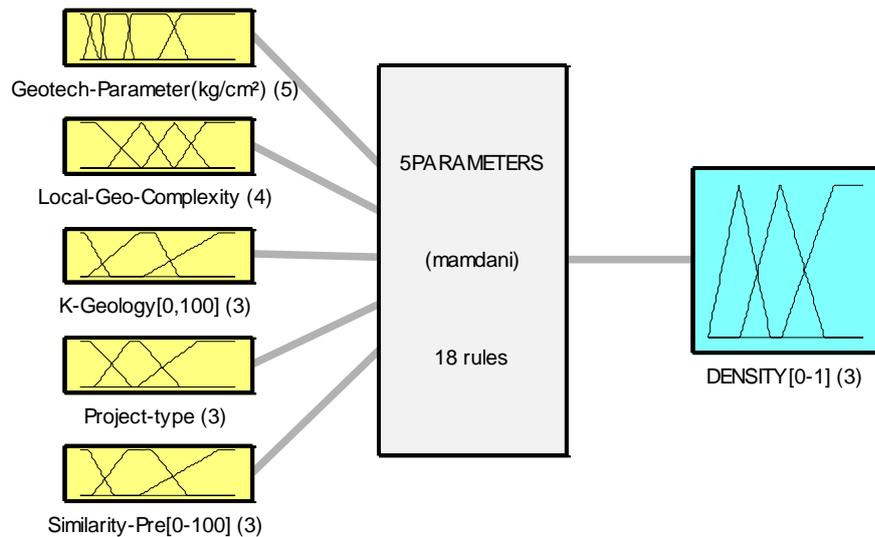


Fig 4.17 l'ensemble flou de sortie « Densité de sondages »

De manière grossière on peut représenter le schéma du système d'inférence à construire comme suit :



System 5PARAMETERS: 5 inputs, 1 outputs, 18 rules

Fig 4.18 Schéma du système d'inférence floue avec cinq paramètres d'entrée (input)

## Règles floues

Un exemple de règles floues utilisées dans le système est donné sous la forme:

- 1) *IF Slope (°) IS "Weak" THEN Density ([0-1]) IS "Low Number"*
- 2) *IF Slope (°) IS "Relatively Average" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*
- 3) *IF Slope (°) IS "Average" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*

- 4) *IF Slope (°) IS "Important" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*
- 5) *IF Slope (°) IS "Very Important" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*
- 6) *IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Hard Clay" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*
- 7) *IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Sandy Clay" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*
- 8) *IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Sand" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*
- 9) *IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Sand and Gravel" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*
- 10) *IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Shales" THEN Density ([0-1]) IS "Low Number"*
- 11) *IF K-Geology (%) IS "Relatively Known" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*
- 12) *IF K-Geology (%) IS "Known" THEN Density ([0-1]) IS "Low Number"*
- 13) *IF Similarity of Preliminary Results (%) IS "Not Similar" THEN Density IS "Important Number"*
- 14) *IF Similarity of Preliminary Results (%) IS "Relatively Similar" THEN Density IS "Average Number"*
- 15) *IF Similarity of Preliminary Results (%) IS "Similar" THEN Density IS "Low Number"*
- 16) *IF Specifically Loaded Zones (%) IS "One Zone" THEN Density IS "Low Number"*
- 17) *IF Specifically Loaded Zones (%) IS "Average" THEN Density IS "Average Number"*
- 18) *IF Specifically Loaded Zones (%) IS "Several Zones" THEN Density IS "Important Number"*

Les règles sont enclenchées en parallèle, un seul type de règle est utilisé pour le moment (SI x est A Alors y est B). Pour chaque règle il y a un antécédent et un conséquent (output).

Un exemple de fonctionnement du système avec uniquement trois paramètres d'entrée est donné dans ce qui suit, pour illustrer l'importance de chaque facteur d'entrée dépendant des règles prises en compte. L'agrégation est basée sur la méthode de Mamdani comme nous pouvons le voir. Le centre de gravité de la surface finale est calculé pour estimer le poids de la décision qui représente ici la densité des sondages à compléter.

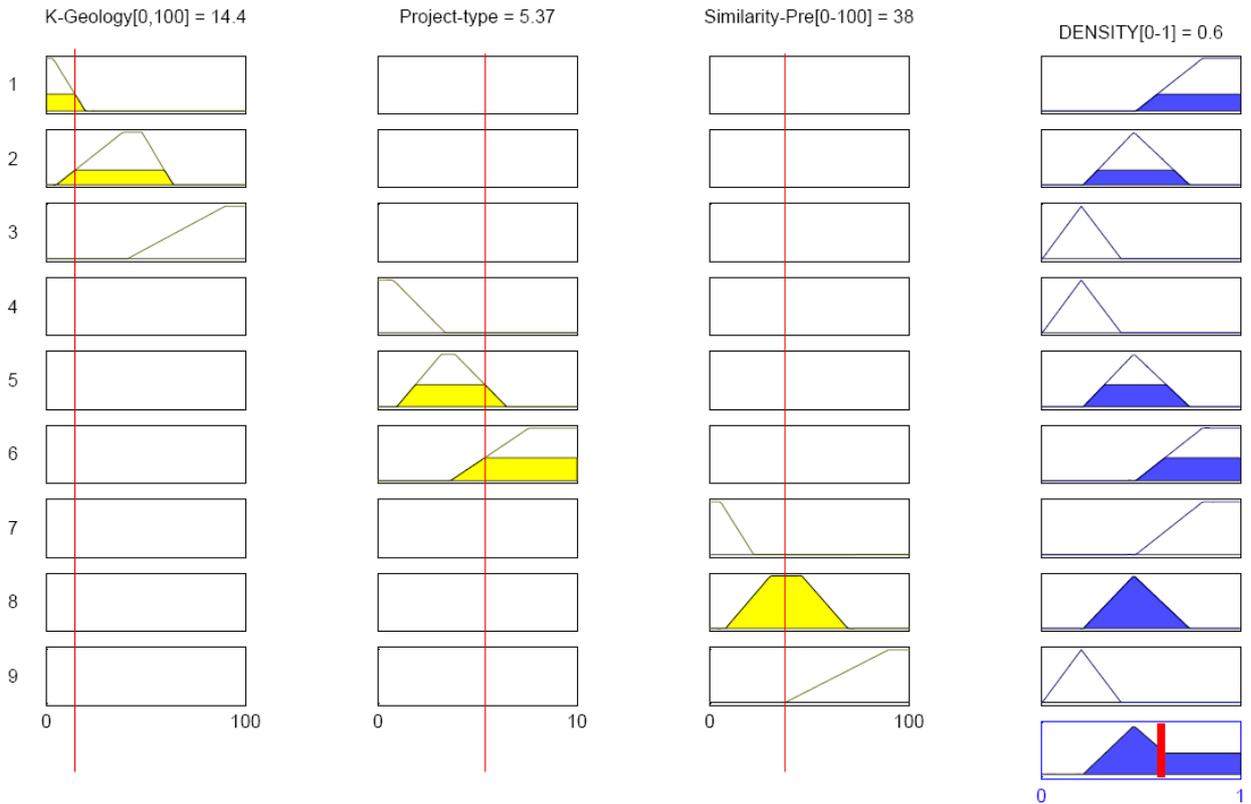


Fig 4.19 Exemple de schéma de règles floues enclenchées avec defuzzification

Un autre type de règle peut être utilisé, dans la forme (SI  $x_1$  est  $A_1$  ET  $x_2$  est  $A_2$ ...etc ALORS  $y$  est  $B$ ).

*IF K-Geology (%) IS "Unknown" AND Similarity of Preliminary Results (%) IS "Not Similar" THEN Density IS "Important Number"*

*IF Project-Type IS "Important" AND Similarity of Preliminary Results (%) IS "Not Similar" THEN Density IS "Important Number"*

Dans ce type de règles nous avons rajouté l'effet d'autres paramètres dans la même règle en utilisant l'opérateur ET, cette formulation des règles est différente de la précédente. La figure 4.20 représente un exemple.

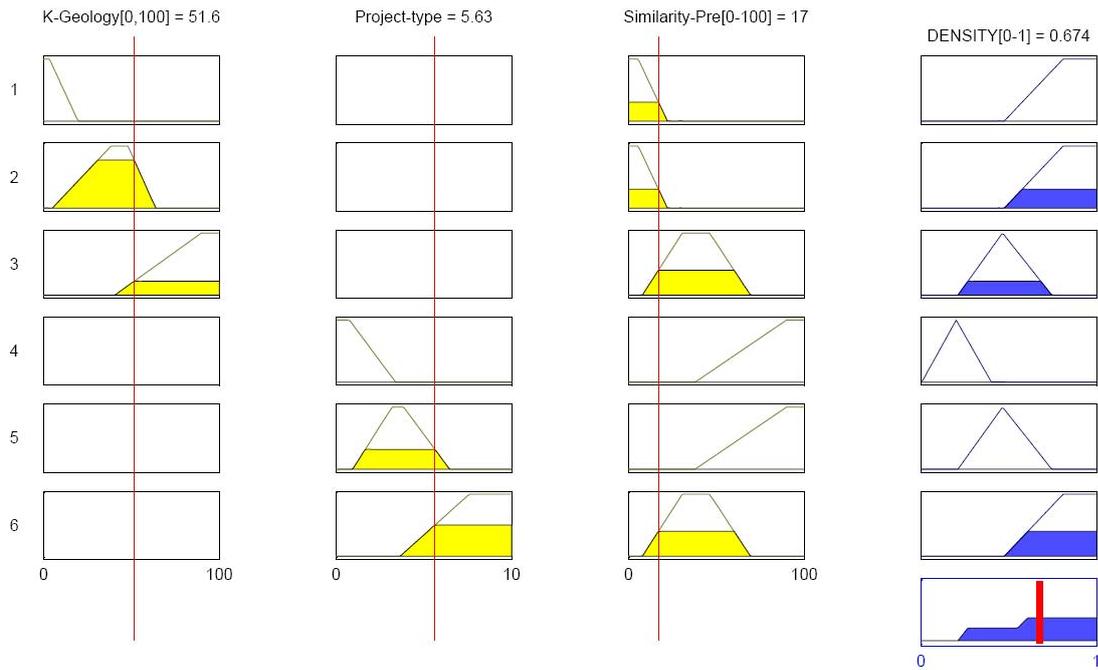


Fig 4.20 Un autre schéma d'enclenchement des règles floues

On voit bien que le système d'agrégation Min-Max de Mamdani est illustré dans cette figure. Dans la règle n°2 par exemple le minimum entre « K-Geology » et « Similarity » est pris en compte en sortie. Quand toutes les règles sont déclenchées le résultat final est le Max de toutes les possibilités obtenus en Sortie. La defuzzification consiste à calculer le centre de gravité de la surface (résultat).

#### 4.5 FONCTIONNEMENT DU SYSTEME D'INFERENCE FLOU

Les paramètres d'entrée sont exprimés en ensembles flous (Géologie, Topographie, Type de projet, et Information sur les sites voisins...). Les paramètres de sortie (output) sont aussi exprimés comme des ensembles flous sur la densité de sondages sur site. Chacun des paramètres d'entrée influence d'une certaine façon le nombre de sondage à exécuter. Le système d'inférence floue fonctionne en utilisant des règles floues reliant l'Input à l'Output comme montré en figure 4.18.

Ces règles sont généralement exprimées en termes linguistiques et considèrent diverses possibilités. Après l'agrégation (combinaison) et la défuzzification un poids G de décision est obtenu. Ce résultat est donné sous forme de résultat entre [0,1]. Lorsque la valeur de G est proche de 1, alors il sera nécessaire d'effectuer un nombre important de

sondages sur site. Et si cette valeur est proche de zéro, donc un nombre minime de sondages sera suffisant.

Le résultat étant donné par une valeur entre 0 et 1, exprimant un poids, ou une densité, il sera nécessaire de le transformer en nombre de sondages. Pour ce faire il faudra calibrer le modèle utilisé en l'appliquant sur des sites réels, et en utilisant les recommandations données par les codes de pratique sur le minimum requis de sondages.

A cet effet le système d'inférence floue est exécuté avec les paramètres d'entrée suivants:

Topographie (pente en °), Conditions géotechniques (kg/cm<sup>2</sup>, m/s), Type de projet, Connaissance de la géologie(%), Complexité de la géologie locale, Similarité des résultats préliminaires (%) et Zones de chargement spécifique.

L'ensemble des règles floues prises en considération pour exécuter le système sont les suivantes :

*IF Slope (°) IS "Weak" THEN Density ([0-1]) IS "Low Number"*

*IF Slope (°) IS "Relatively Average" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*

*IF Slope (°) IS "Average" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*

*IF Slope (°) IS "Important" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*

*IF Slope (°) IS "Very Important" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*

*IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Hard Clay" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*

*IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Sandy Clay" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*

*IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Sand" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*

*IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Sand and Gravel" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*

*IF Geology (kg/cm<sup>2</sup>) IS "Shales" THEN Density ([0-1]) IS "Low Number"*

*IF Geometry (RI%) IS "Irregular" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*

*IF Geometry (RI%) IS "Averagely Irregular" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*

*IF Geometry (RI%) IS "Regular" THEN Density ([0-1]) IS "Low Number"*

*IF K-Geology (%) IS "Unknown" THEN Density ([0-1]) IS "Important Number"*

*IF K-Geology (%) IS "Relatively Known" THEN Density ([0-1]) IS "Average Number"*

*IF K-Geology (%) IS "Known" THEN Density ([0-1]) IS "Low Number"*

*IF Local Geology Complexity IS "Low" THEN Density IS "Low Number"*

*IF Local Geology Complexity IS "Average" THEN Density IS "Average Number"*  
*IF Local Geology Complexity IS "Complex" THEN Density IS "Important Number"*  
*IF Local Geology Complexity IS "Very Complex" THEN Density IS "Important Number"*  
*IF Similarity of Preliminary Results (%) IS "Not Similar" THEN Density IS "Important Number"*  
*IF Similarity of Preliminary Results (%) IS "Relatively Similar" THEN Density IS "Average Number"*  
*IF Similarity of Preliminary Results (%) IS "Similar" THEN Density IS "Low Number"*  
*IF Specifically Loaded Zones (%) IS "One Zone" THEN Density IS "Low Number"*  
*IF Specifically Loaded Zones (%) IS "Average" THEN Density IS "Average Number"*  
*IF Specifically Loaded Zones (%) IS "Several Zones" THEN Density IS "Important Number"*

Les résultats limites de la defuzzification sont 0.201 et 0.810. Le premier résultat s'obtient dans le cas de conditions favorables extrêmes (Topographie (0°), Connaissance de la géologie à 100% etc. ) et le second résultat exprime le cas où toutes conditions sont extrêmement défavorables (Géologie inconnue, Variabilité extrême...). Le premier résultat (0.201) indique que très peu de sondages sont nécessaires pour caractériser le sol, et le second résultat (0.81) exprime le fait qu'un nombre très important de sondages est requis.

## **4.6 TRANSFORMATION DE LA DENSITE G EN UN NOMBRE DE SONDAGES**

### **4.6.1 APPROCHE I**

Le résultat du S.I.F est donné comme on vient de le montrer, sous forme de poids  $G$  variant entre 0 et 1 et exprimant une densité de sondages sur site. Pour transformer cette densité  $G$  en un nombre de sondages nous introduisons  $N_{\min}$  un nombre de sondages de référence minimal recommandé par les codes (Eurocode7, FHWA),  $N_{\text{opt}}$  le nombre optimal de sondages à chercher sur un site, et un poids  $G_{\min}$  correspondant à  $N_{\min}$

#### **4.6.1.1 Recommandations sur le nombre minimal de sondages**

Certains documents techniques recommandent "des lignes directrices" permettant d'avoir le « minimum » de données sur le sous-sol afin de compléter une investigation

géotechnique effective. Ces guides précisent que le nombre de forages (sondages) dépend du type de projet et de ses exigences. Cependant il n'existe pas de règles « rigides » établies pour cet objectif (FHWA 2002). Le nombre minimum de sondages requis ( $N_{\min}$ ) peut être établis en se basant sur ces lignes directrices, et il est évident qu'au-delà d'un certain nombre de sondages il y aura de la redondance d'information qui n'aide toujours pas à une meilleure connaissance du site. L'un des objectifs de cette étude est de mettre en place une procédure systématique pour vérifier si plus d'un nombre minimal de sondages est requis pour caractériser un site.

Le guide ("minimum" boring, sampling and testing criteria) édité par F.H.W.A (2002) recommande pour le cas des fondations de structures, un nombre minimum de sondages de un (1) par unité de sous-structure de 30m de large, et deux (02) par unité de sous-structure dont la largeur est plus grande que 30m. Des sondages additionnels sont recommandés dans le cas où les conditions de sous-sol sont erratiques.

Selon l'Eurocode 7 (1997) ainsi que Simons et al. (2002) l'espacement entre sondages, pour des fondations de structures, est souvent compris entre 20 et 40m. Un sondage toutes les 40m est considéré comme « minimal », et 1 sondage toutes les 20m peut être pris comme un « maximum » à exécuter. La disposition des forages et leur fréquence sont partiellement contrôlés la complexité des conditions géologiques du site. Si les conditions du sol sont relativement uniformes un espacement large entre sondages pourrait être satisfaisant mais si les conditions sont complexes alors l'espacement doit être réduit entre les trous (Simons et al. 2002)

Le nombre « minimum » de sondages tel que recommandé par FHWA (2002) ou par Simons et al. (2002) et par l'Eurocode7 dépend uniquement des dimensions du projet, autrement dit de sa surface sans prendre en compte les paramètres que nous avons cités dans les sections précédentes ; ces paramètres qui peuvent avoir une influence sur la densité des sondages ne sont pas considérés.

### ***Le nombre optimal de sondages***

Le nombre optimal  $N_{\text{opt}}$  de sondages est le nombre permettant d'avoir une caractérisation satisfaisante du site et il est jugé suffisant. Ce nombre est généralement plus grand que le minimum  $N_{\min}$  recommandé par les codes de pratiques et les documents techniques (FHWA, Simons et al., Eurocode7 ).

Lors de la conduite d'une investigation géotechnique un petit nombre de sondages préliminaires est effectué, il permet d'avoir une idée grossière sur les conditions du sous-sol (étape préliminaire). En deuxième phase le nombre de sondages sera plus important et permet de mieux caractériser le sol. Dans un document de l'US army (1994) il est indiqué que le nombre de sondages en seconde étape pour des projets de soutènements, varie entre 2 et 5 fois le nombre de sondages effectués en phase préliminaire.

La question fondamentale relative au Système d'Inférence Floue que nous projetons de construire est de savoir comment faire le lien entre, le résultat G du SIF pour un site donné, et un nombre réel de sondages à exécuter. Comment traduire le résultat G qui représente une densité entre [0,1] en un nombre effectif de sondages.

L'idée est d'exécuter le SIF sur des sites où le nombre optimal  $N_{opt}$  de sondages est connu et l'information sur les sites en question disponible (Géologie, Topographie, Type de projet...). Pour chacun de ces sites les codes de pratique recommandent un nombre minimal  $N_{min}$  qui dépend de la surface du projet à y implanter.

En prenant en considération toute l'information disponible sur un site avec  $N_{opt}$  le SIF peut représenter avec un certain degré de confiance la réalité du terrain. Le nombre optimal de sondages ( $N_{opt}$ ) est admis pour être suffisant à caractériser le site. Nous pouvons assumer aussi que le résultat G peut être « relié » au nombre de sondages optimal  $N_{opt}$  (donné). Et comme nous savons le nombre minimal  $N_{min}$  tel que recommandé par les code de pratiques et les documents techniques pour chaque site, il serait possible de supposer l'existence d'un certain  $G_{min}$  correspondant à ce  $N_{min}$ .

En récapitulant, nous avons l'assertion suivante ;

*SI G Correspond à «  $N_{opt}$  Nombre Optimal de Sondages »*

*ET*

*SI  $G_{min}$  Correspond à «  $N_{min}$  Nombre Minimal de Sondages »*

*ALORS*

$$G_{min} = (N_{min} * G) / N_{opt} \quad (1)$$

Le poids  $G_{\min}$ , correspondant au nombre “minimum” de sondages  $N_{\min}$  recommandé par les documents techniques, est alors déduit et il sera utilisé par la suite sur d’autres sites dont on cherche le nombre « optimal » de sondages à y exécuter. De la formule (1) on déduira alors le nombre optimal comme suit :

$$N_{\text{opt}} = (N_{\min} * G) / G_{\min} \quad (2)$$

$G_{\min}$  Donnée par calibrage (application sur plusieurs sites dont les conditions et  $N_{\text{opt}}$  sont connus).

$G$  : Résultat du SIF,  $N_{\min}$  Donnée par les codes de pratique ou document techniques (Eurocode7, FHWA)

Dans la section suivante nous appliquerons le SIF sur un site réel dont  $N_{\text{opt}}$  est connu et ce pour calibrer la valeur de  $G_{\min}$  . D’autres données sont disponibles sur le site en question, tels que la géologie, la topographie, le type de projet, etc.

#### **4.6.1.2 Application**

Dans cet exemple les données sont disponibles et le nombre de sondages réalisés sur site est connu. Le Système d’Inférence Floue est exécuté en utilisant les paramètres disponibles et le résultat obtenu est utilisé comme calibration de  $G_{\min}$  à user dans d’autres sites.

Le site en question est décrit dans “Adaptive Ground Modelling in geotechnical engineering” (Schönhardt and Witt, 2003), les principales caractéristiques du site de projet sont, telles qu’illustrées en figure 4.21:

- La surface de la zone d’étude :  $100 \times 250 \text{m}^2$
- La surface du projet  $83 \times 205 \text{m}^2$
- Type de projet : Industriel
- Topographie : plane
- Géologie (degré d’information) : relativement inconnu
- Les résultats préliminaires indiquent trois formations géologiques (Argile silteuse de consistance faible, Argile raide entre 8-14m, Argile sableuse jusqu’à 70m de profondeur)

- Zones de chargements spécifiques (Machines) représentent environ 13% de la surface totale du projet.
- Pas d'information disponible sur les sites voisins.
- Les résultats préliminaires indiquent une certaine similarité (autour de 60%)
- Le nombre de sondages préliminaires est de 8, exécutés aux coins du site, et au milieu. Le nombre de total de sondages conduits est de 28.

Pour cet exemple, les paramètres d'entrée du Système d'Inférence Floue ont été pris comme suit : Topographie (Pente) « faible » avec une valeur moyenne autour de 3°, l'information sur la géologie du site est prise comme étant « faible » autour de 15% (pas de cartes géologiques disponibles) et la complexité de la géologie locale est classée « Moyenne ». Les résultats des sondages préliminaires indiquent que trois formations sont présentes dans le site et ils montrent une certaine similarité entre les résultats (autour de 60%). Dans ce projet industriel, nombre de zones seront sujettes à des chargements spécifiques (machines), la surface de chargement est « relativement importante » comme indiqué sur la figure 4.21.

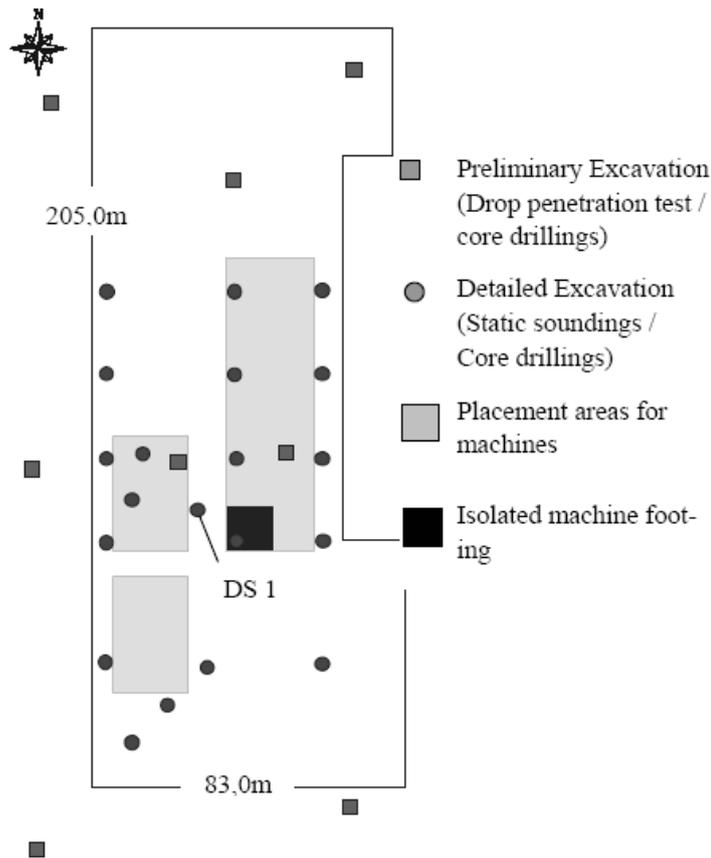


Fig 4.21 Le site d'étude (d'après Schönhardt et Witt, 2003)

En utilisant les règles mentionnées précédemment, et en prenant en compte les conditions du site précitées le Système d'Inférence a permit de calculer le poids du résultat  $G=0.565$ . Ce poids est une indication sur le nombre de sondages nécessaires à effectuer sur site. Les limites extrêmes des résultats nous le rappelons sont, 0.201 et 0.810.

Après défuzzification, le résultat obtenu  $G=0.565$  permet à l'ingénieur d'avoir une appréciation sur la conduite de l'investigation géotechnique et spécialement sur le nombre de sondages, le résultat indique que plus qu'un nombre « minimum » est requis pour caractériser le site. Le système d'inférence utilisé reflète d'une certaine façon les conditions réelles du site incluant les contraintes liées à la complexité de la géologie et à la nature du projet.

***Nombre minimal de sondages selon les codes de pratique (Eurocode7)***

Le nombre "minimum" de sondages tels que recommandés par FHWA(2002) ou par Eurocode 7(1997) ainsi que Simons et al.(2002) dépend uniquement de l'aire du projet ;

d'autres paramètres pouvant avoir une influence sur le nombre de sondages ne sont pas pris en considération.

Dans cet exemple, pour une aire de 85x200m<sup>2</sup>, le nombre « minimum » de forages est de 6x3=18, si des unités de sous-structures de 30x30m<sup>2</sup> sont considérées en accord avec les recommandations de FHWA(2002).

#### *Nombre optimal de sondages*

Schönhardt et Witt(2003) ont considéré 20 sondages supplémentaires à ceux exécutés en étape préliminaire et qui étaient de huit (08), ainsi le nombre total de sondages pour caractériser le site est de 28. Ce nombre qui est plus grand que le « minimum » recommandé par FHWA(2002), est considéré comme suffisant pour obtenir une information adéquate sur le sous-sol du site. Pour calibrer le Système d'Inférence Floue développé, le nombre total de sondages effectués pour ce site est considéré « Optimal » et noté **N<sub>opt</sub>**.

Le résultat  $G = 0.565$  obtenu de l'application du SIF est supposé correspondre, avec un certain degré de confiance, au nombre « Optimal »  $N_{opt}=28$  sondages, donné par Schönhardt et Witt (2003). De la même manière, le nombre « minimum » de sondages (**N<sub>min</sub>**) tel que suggéré par FHWA(2002) est relié à un certain poids **G<sub>min</sub>** qui reste à définir.

Nous rappelons l'assertion définie auparavant et basée sur le jugement de l'ingénieur, selon laquelle on peut extraire  $G_{min}$  en utilisant la formule (1) :

$$G_{min} = (N_{min} * G) / N_{opt}$$

En introduisant les valeurs des paramètres de l'exemple dans la formule nous obtenons ;

$$G_{min} = (18 \times 0.565) / 28$$

Cette valeur est prise pour calibrer le système.

Si plusieurs sites de projets disposent d'un certain nombre d'informations telles que  $N_{opt}$ , le SIF sera exécuté pour chacun des sites en prenant en compte les paramètres disponibles. Le nombre minimum de sondages  $N_{min}$  est donné par les codes de pratique (FHWA...) pour chaque site. La moyenne des valeurs de  $G_{min}$  sera calculée en utilisant (1)

pour tous les cas et ainsi utilisée comme valeur standard pour un nouveau site dont on cherche le nombre « optimal » de sondages  $N_{opt}$ .

### ***Utilisation de $G_{min}$***

Pour un nouveau site de projet pour lequel  $N_{opt}$  est recherché nous utiliserons le  $G_{min}$  de calibrage (standard) obtenu de l'application précédente (Schönhardt and Witt, 2003). Le nombre « optimal »  $N_{opt}$  de sondages attendu pour ce site sera alors calculé en utilisant la formule :

$$N_{opt} = (N_{min} * G) / G_{min}$$

#### **4.6.1.3 Exemple d'étude**

Dans ce cas d'étude nous utilisons le SIF pour estimer le nombre "optimal"  $N_{opt}$  de sondages à exécuter sur site sous des conditions particulières.

Le site est supposé recevoir un bâtiment localisé à coté d'une école existante (figure 4.22). Il consiste en constructions de deux et trois étages ayant une envergure au sol d'environ 6500m<sup>2</sup>. Il est admis que les charges seront typiques pour un bâtiment de ce genre et de cette taille (Strater and McKown, 2002).

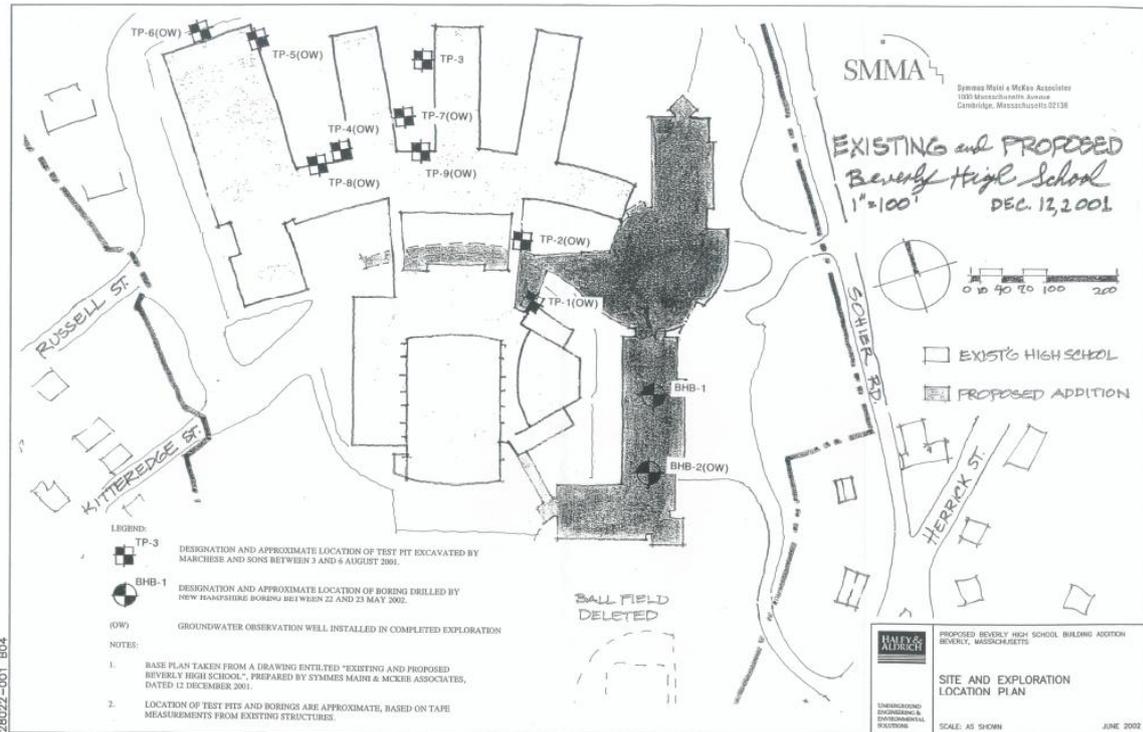


Fig 4.22 Site d'étude

Une investigation préliminaire a été effectuée et a consisté en deux forages tests BHB-1 et BHB-2 (OW) tel que indiqué sur la figure. Ils ont été exécutés dans l'enceinte du projet proposé, à des profondeurs approximatives de 12.30m et 12m. Des puits d'essais ont été creusés auparavant au voisinage des bâtiments existants pour déterminer le sous-sol et les conditions des eaux souterraines adjacents aux fondations existantes. Ils sont notés TP-1 à TP-9 sur la figure. Les conditions de sous-sol observées indiquent ;

En surface : Une infime couche de limon.

Remblai : rencontré dans le voisinage du projet à construire, son épaisseur est d'environ 1m et consiste en un sable limoneux moyennement dense. Dans les TP1 et TP2 il consiste en limon sableux marron avec du gravier et de l'argile faiblement sableuse.

Dépôts marins : rencontrés dans les sondages BHB1 et BHB2(OW) consistant en un sable moyennement dense à dense faiblement gradué avec limon et sable limoneux. L'épaisseur varie entre 11.30m à 13.7m dans la portion sud du site. Dans la partie nord l'épaisseur varie de 0m jusqu'à 4.5 à 6m.

Couche dite 'Glacial Till': consistant en un sable très dense avec limon et gravier. Ces sols sont rencontrés sous les dépôts marins en BHB2(OW) à une profondeur autour de 11.30.

ces Glacial Till n'ont pas été rencontrés dans les sondages BHB1. Les ingénieurs ont anticipé sur la présence d'une couche de Glacial Till discontinue variant en épaisseur de 0 à 1.5m sur la plupart du site.

Bedrock (substratum) : a été rencontré dans les puits d'essais TP3 et TP6 à des profondeurs de 1m environ. Mais il n'a pas été rencontré par les sondages effectués.

Les ingénieurs en charge de l'investigation préliminaire ont recommandé un programme d'exploration du sous-sol de 3 à 5 sondages pour test supplémentaires et de 3 à 5 forages d'essais dans le site du bâtiment à construire.

### ***Utilisation du système d'inférence floue***

Pour utiliser le système d'inférence floue, on extrait l'information disponible du site d'étude, définie pour les différents paramètres d'entrée.

- La pente est relativement moyenne de 25% correspondant à une moyenne de 15°.
- L'information sur les sites voisins existe et peut être exploitée.
- Le type de projet à construire est un bâtiment pour école de trois (03) étages.
- La géologie est « relativement inconnue » et il est suspecté d'avoir un grand degré de variabilité du sol si l'on observe les couches rencontrées en investigation préliminaire.
- Les résultats des sondages préliminaires (02) indiquent d'importantes différences. D'où un degré de « similarité » très faible.
- Le module statique de la couche de sable avec limon et sable limoneux varie entre 100 et 250kg/cm<sup>2</sup>

Une fois les règles du SIF enclenchées et le calcul effectué, la défuzzification a permis d'obtenir un poids, résultat final,  $G=0.546$ .

Selon Simons et al.(2002) le nombre « minimum » de sondages requis pour cette surface (6500m<sup>2</sup>) est  $N_{\min}= 6$ .

En utilisant le résultat **G** du Système d'Inférence Flou et l'expression (3), on peut calculer le nombre optimal de sondages à prédire ;

$$N_{\text{opt}} = N_{\text{min}} * G/G_{\text{min}}$$

$G_{\min}$  est donné comme valeur standard (calibration) obtenue du premier exemple (Schönhardt et Witt, 2003).

$$N_{\text{opt}} = 6 \times 0.546 / 0.363 = 9.02$$

D'où le nombre optimal de 9 sondages requis pour ce site.

Comme on peut le constater le résultat du Système d'Inférence Flou mis en place prédit un nombre de sondages dans le même ordre que le nombre proposé par les ingénieurs en charge de cette étude géotechnique. Ils ont proposé un nombre de sondages supplémentaires (pour la deuxième phase d'investigation) entre 6 et 10. Le nombre de sondages préliminaires exécutés étant de deux (02), on se retrouve donc avec une investigation géotechnique avec un nombre de sondages entre 8 et 12. Ces nombres sont le fruit du jugement des ingénieurs en charge de l'étude.

Si l'on considère leur jugement comme étant fiable, alors on peut dire qu'en utilisant indépendamment le Système d'Inférence mis en place, nous sommes arrivés à estimer le nombre de sondages sur site et à tenir compte des incertitudes rencontrées.

#### **4.6.1.4 Utilisation des nombres flous pour calculer le nombre optimal de sondages**

Dans les calculs antérieurs nous avons utilisé des nombre réels pour estimer  $N_{\text{opt}}$ , le nombre optimal de sondages. Une autre façon de faire consiste à utiliser des nombres flous, ce qui permettrait de mieux appréhender les incertitudes.

##### ***Transformation du « nombre optimal » et du « nombre minimal » en nombres flous***

Si un intervalle est considéré autour du nombre "optimal" de sondages  $N_{\text{opt}}$ , alors les outils de la logique floue peuvent être utilisés pour exprimer un nombre flou « optimal », une fonction d'appartenance peut être construite pour représenter la tendance du nombre ainsi défini. De la même façon, les outils de la logique floue peuvent être appliqués pour exprimer un nombre flou autour de  $N_{\min}$  le « minimum » recommandé par les codes de pratiques (FHWA, 2002 ; Simons et al. 2002, etc).

L'utilisation des intervalles flous autour de  $N_{\text{opt}}$  et  $N_{\min}$  permet de tenir compte des incertitudes. Aussi ceci permet de relier, avec un certain degré de confiance, le résultat

poids G avec le nombre « optimal » flu de sondages. Les nombres flous sont notés par des accolades [ ].

Lorsque [N<sub>opt</sub>] et [N<sub>min</sub>] sont pris comme étant des nombre flous, l'expression (1) devient;

$$[G_{min}] = \{[N_{min}] (X) G\} \emptyset [N_{opt}] \quad (3)$$

[N<sub>opt</sub>], [N<sub>min</sub>] : Nombres flous;

[G<sub>min</sub>]: Résultat (nombre flu), (X) : est l'opérateur flu "Produit",

∅ : est l'opérateur flu "Quotient"

**Transformation de N<sub>opt</sub> et N<sub>min</sub> de l'exemple (Schönhardt et Witt, 2003)**

Le nombre optimal de sondages N<sub>opt</sub> est 28 et le nombre minimum N<sub>min</sub> déduit d'après les recommandations de FHWA(2002) est de 18. Les nombres flous construit autour de N<sub>opt</sub> et N<sub>min</sub> sont [N<sub>opt</sub>] = (23, 27, 29, 34) et [N<sub>min</sub>] = (13,17, 19, 22). La figure 4.23 montre ces nombres.

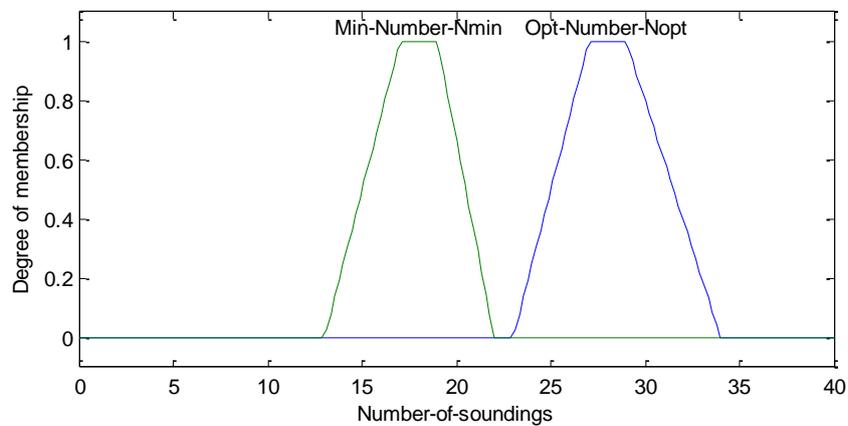


Fig 4.23 Construction de N<sub>min</sub> et N<sub>opt</sub> sous forme de nombres flous

Après avoir effectué les calculs en utilisant les opérateurs flous de l'expression (2) (Bouchon-Meunier, 1995) nous obtenons ;

[G<sub>min</sub>] = (0.2044, 0.3314, 0.3972, 0.5182) tel que montré sur la figure 4.24

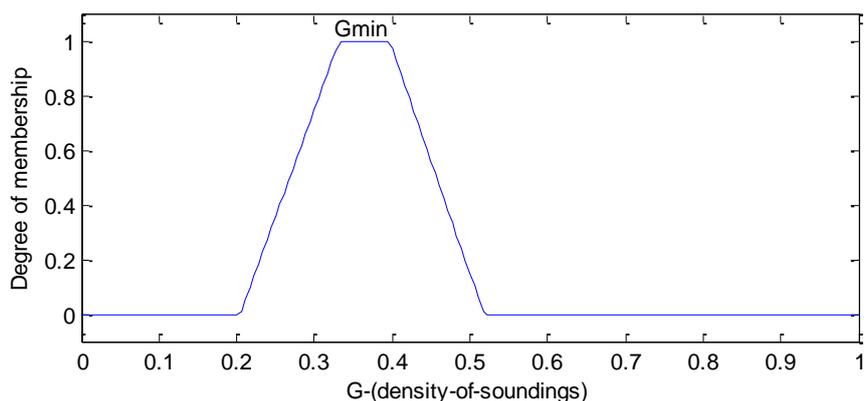


Fig 4.24  $G_{\min}$  sous forme de nombre flou

La figure 4.24 illustre le  $[G_{\min}]$  obtenu qui est le poids (densité) correspondant au nombre « minimum » de sondages tels que donnés par FHWA(2002). Ce  $[G_{\min}]$  sera utilisé dans d'autres cas comme valeur standard (de calibrage) pour calculer le nombre « optimal » de sondages en usant de l'expression (3).

$$[N_{\text{opt}}] = \{[N_{\text{min}}](X) G\} \emptyset [G_{\min}]$$

Dans l'exemple considéré, le résultat  $G=0.565$  obtenu est assumé qu'il représente avec un degré de confiance appréciable le « nombre optimal » donné par Schönhardt et Witt (2003).

Nous appliquons les calculs sur l'exemple qui a été présenté auparavant.

D'après Simons et al.(2002) le nombre minimum de sondages requis pour cette surface( $6500\text{m}^2$ ) est  $N_{\min}=6$ . Dans ce cas, le nombre flou a été construit comme suit ;  $[N_{\min}] = (5, 6, 8, 9)$ ; où  $[6,8]$  est le « noyau » de l'ensemble flou trapézoïdal considéré.

En utilisant le résultat  $G$  du Système d'Inférence et l'expression (3) ;

$$[N_{\text{opt}}] = \{[N_{\min}] (X) G\} \emptyset [G_{\min}]$$

$[G_{\min}]$  est donné et pris comme valeur standard obtenue du premier exemple (Schönhardt et Witt, 2003).

Bouchon-Meunier (1995) a présenté quelques simplifications pour les opérations de produit et division sur les ensembles flous. Nous nous sommes appuyés sur ces simplifications pour effectuer les calculs.

Nous avons obtenu le nombre « optimal » flou de sondages suivant ;

$$[N_{opt}] = (4.9474, 8.2477, 13.1804, 20.6972)$$

La figure 4.25 illustre cet ensemble avec comparaison par rapport à l'ensemble flou nombre « minimum » de sondages.

Si l'on observe le nombre optimal obtenu dans ce cas, on remarque que pour caractériser le site nous aurons besoin d'un nombre de sondages variant entre 8 et 13.

Le résultat du Système d'Inférence Floue est dans les mêmes plages de valeurs que ce qui a été proposé par les ingénieurs en charge de l'étude géotechnique. Ils ont proposé un total de sondages entre 8 et 12.

Si le jugement de l'ingénieur, relatif au nombre de sondages recommandés, est considéré fiable, alors le système d'inférence floue que nous avons proposé et utilisé indépendamment pour estimer ce nombre, montre des résultats consistants.

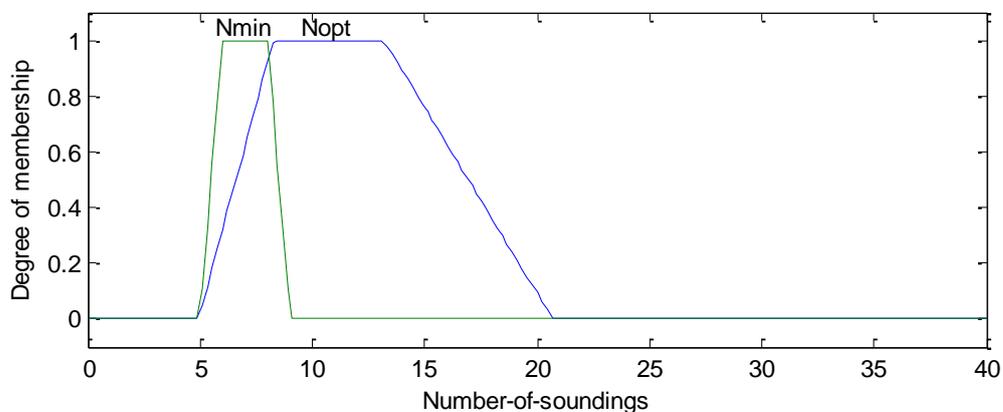


Fig 4.25 Résultats obtenus,  $N_{opt}$  sous forme de nombre flou

Dans la précédente approche (I) nous avons suivi une certaine démarche pour estimer le nombre optimal  $N_{opt}$  de sondages requis pour une investigation géotechnique en se basant sur le fait que le  $G_{min}$  de calibrage sera utilisé pour toute nouvelle investigation comme une valeur standard. Toutefois le  $G_{min}$  a été obtenu à partir d'un seul cas réel (Schönhardt et Witt, 2003). Pour que la démarche soit fiable il faudra déduire un

nombre important de  $G_{\min}$  de cas réels (connus) et prendre leur moyenne afin de l'utiliser pour estimer  $N_{\text{opt}}$  pour tout nouveau site.

#### **4.6.2 APPROCHE II**

Une seconde approche (II)) est proposée dans cette section. Dans la dite approche on évite d'avoir affaire au problème du manque de cas réels pour déduire la moyenne des  $G_{\min}$  à utiliser comme valeur standard. Elle consiste à analyser tout d'abord l'ensemble des résultats possibles du système d'inférence.

Nous remarquons que tous les résultats du SIF sont contenus dans la plage de valeurs [0.201, 0.810], qui correspondent à des conditions extrêmes de paramètres d'entrée. D'un autre coté nous savons que les codes de pratiques (Eurocode7, Simon et al. 2002 ) proposent d'effectuer des sondages entre 20 et 40m. Ce qui s'apparente à un nombre minimal et un nombre maximal de sondages en fonction de la surface du projet. Le minimum est donc 1 sondage pour une surface de  $40 \times 40 \text{m}^2$  et le maximum est 1 sondage pour chaque  $20 \times 20 \text{m}^2$  d'aire selon l'Eurocode7 et Simons et al. (2002). Le  $G_{\text{ref}}$  à utiliser dans cette démarche est la valeur moyenne de l'ensemble des résultats du SIF et nous la ferons correspondre à une valeur moyenne des recommandations de l'Eurocode7 (1 sondage par surface de  $30 \times 30 \text{m}^2$ ). Dans un autre cas, la valeur minimale des résultats [0.201, 0.810] correspondra au minimum requis par l'Eurocode7, 1 sondage tous les 40m.

##### **4.6.2.1 Transformation du résultat G du SIF en nombre de sondages**

Le résultat G du SIF exprime une densité de sondages sur site. Pour transformer cette densité en un nombre optimal de sondages  $N_{\text{opt}}$  nous introduisons  $N_{\text{ref}}$  le nombre référence de sondages recommandé par les règlements ou codes de pratique (Eurocode7, FHWA...) ainsi qu'un poids  $G_{\text{ref}}$  qui correspond à  $N_{\text{ref}}$ .  $G_{\text{ref}}$  est compris dans l'intervalle des valeurs possibles des résultats du SIF.

*Pour  $G$  Correspondant au "Nombre Optimal de sondages  $N_{\text{opt}}$ "*

*Et*

*Pour  $G_{\text{ref}}$  Correspondant au "Nombre de sondages de Référence  $N_{\text{ref}}$ "*

Nous obtenons,

$$N_{opt} = (N_{ref} * G) / G_{ref} \quad (4)$$

$G_{ref}$  correspond au nombre de référence  $N_{ref}$  de sondages donné par les codes de pratique qui ne dépend que de la surface du projet.

### ***Recommandations des codes de pratique sur le nombre de référence $N_{ref}$***

Nous avons déjà mentionné dans la section précédente les recommandations des codes de pratique (Eurocode7, FHWA...) relatives au nombre de référence  $N_{ref}$  de sondages. 1 sondage par surface de  $30 \times 30 \text{m}^2$  selon la FHWA (2002). L'Eurocode 7 recommande pour de larges projets d'effectuer 1 sondage pour des distances allant de 20 à 40m. Simons et al. (2002) recommande également un sondage entre 20 et 40m de distance.

### ***Calibration d'un $G_{ref}$ de référence :***

En vue d'appliquer le SIF sur des sites réels, nous calibrons un certain  $G_{ref}$  avec les codes de pratique (Eurocode7, FHWA). Les résultats extrêmes du système d'inférence floue sont  $G=0.201$  et  $G=0.810$ . Du moment que toutes les valeurs de  $G$  sont comprises dans l'intervalle  $[0.201, 0.810]$  nous avons choisi un  $G_{ref}$  comme étant la valeur moyenne des résultats ;

$$G_{ref} = (0.201 + 0.81) / 2 = 0.505$$

Ce  $G_{ref}$  valeur moyenne des résultats correspond à un nombre de sondages de référence  $N_{ref}$  égal à la moyenne des recommandations de l'Eurocode7, 1 sondage entre 20 et 40m. Dans ce cas  $N_{ref}$  sera 1 sondage tous les 30m de surface du projet.

En utilisant l'expression (4) nous pouvons prédire le nombre optimal  $N_{opt}$  de sondages pour une investigation géotechnique d'un site donné en se basant sur les résultats du système d'inférence floue.

La valeur calibrée de  $G_{ref} = 0.505$  permet aussi de prédire des valeurs extrêmes de  $N_{opt}$  lorsque  $G=0.201$  valeur inférieure et  $G=0.810$  valeur supérieure.

Nous obtenons, pour une valeur moyenne de référence de l'Eurocode7,  $N_{ref} = 1/(30 \times 30 \text{m}^2)$  ;

$$N_{opt} = (N_{ref} * G) / G_{ref}$$

=  $N_{min} = 1/30 \times 30 * 0.201 / 0.505 = 1 / (48 \times 48) \text{ m}^2$ , 1 sondage pour une aire de  $48 \times 48 \text{ m}^2$  comme nombre minimal. Ce nombre est plus petit que le minimum proposé par l'Eurocode7,  $N_{min} = 1/40 \times 40 \text{ m}^2$ .

Et

$N_{max} = (1/(30 \times 30) * 0.810) / 0.505 = 1 / (24 \times 24) \text{ m}^2$ , 1 sondage par aire de  $24 \times 24 \text{ m}^2$ , qui est le nombre maximal de sondages, et dans ce cas celui-ci est moins important que celui de l'Eurocode7, 1 sondage pour une surface de  $20 \times 20 \text{ m}^2$ .

En second lieu nous standardisons  $G_{ref}$  en utilisant la valeur minimale de l'intervalle  $[0.201, 0.810]$  et nous calibrons la valeur de  $G_{ref}$  avec le nombre minimal de sondages  $N_{ref}$  recommandé par l'Eurocode 7 (un sondage par surface de  $40 \times 40 \text{ m}^2$ ).

Dans ce cas nous obtenons les valeurs extrêmes de  $N_{opt}$  pour  $G=0.201$  et  $G=0.810$  ;

$$N_{opt} = (N_{ref} * G) / G_{ref}$$

=  $N_{min} = 1/(40 \times 40) * 0.201 / 0.201 = 1 / (40 \times 40) \text{ m}^2$ , 1 sondage tous les  $40 \times 40 \text{ m}^2$ , comme nombre minimal.

Et

$N_{max} = 1/40 \times 40 * 0.810 / 0.201 = 1 / (20 \times 20) \text{ m}^2$ , 1 sondage par aire de  $20 \times 20 \text{ m}^2$ , représentant le nombre maximal de sondages.

Les nombres obtenus dans ce cas sont confondus à ceux proposés par l'Eurocode7, un sondage tous les  $40 \times 40 \text{ m}^2$  comme minimum et 1 sondage tous les  $20 \times 20 \text{ m}^2$  représentant le nombre maximum.

Donc pour un site donné, pour lequel une investigation est planifiée, nous pouvons utiliser  $G_{ref}$  comme calibration à partir de l'Eurocode7, ce qui permet d'avoir un intervalle de valeurs de  $N_{opt}$  par la suite.

Les recommandations de FHWA(2002) indiquent un nombre minimal  $N_{ref}$  de sondages tous les 30m. Nous pouvons utiliser  $G_{ref} = 0.201$  comme correspondant à ce  $N_{ref}$

minimum, et nous pouvons prédire le nombre maximal de sondages  $N_{\max}$  en utilisant  $G=0.810$  la limite supérieure des résultats du SIF.

L'expression (4) donne dans ce cas ;

$$N_{\text{opt}} = (N_{\text{ref}} * G) / G_{\text{ref}}$$

=  $N_{\max} = 1/(30 \times 30) * 0.810 / 0.201 = 1/(15 \times 15) \text{m}^2$ , un sondage pour une surface de  $15 \times 15 \text{m}^2$ .

Le  $N_{\max}$  obtenu est plus grand que le maximum recommandé par l'Eurocode7 ( $1/20 \times 20 \text{m}^2$ ).

Dans la présente démarche II, les exemples de la section précédente seront pris directement comme applications pour le SIF et ainsi comparer les résultats, du moment que le nombre de sondages de ces sites sont donnés.

#### 4.6.2.2 Applications

##### *Exemple 1*

L'exemple cité précédemment d'après Schönhardt et Witt (2003) a été repris. Le nombre de sondages exécutés étant connu. Le résultat du système d'inférence flou appliqué auparavant est repris ici pour comparaison.

Nous utilisons en premier lieu  $G_{\text{ref}} = 0.505$  et le nombre de référence  $N_{\text{ref}}$  de sondages selon la moyenne des recommandations de l'Eurocode 7 (1 sondage tous les  $30 \times 30 \text{m}^2$ ) est de 18 pour la surface du projet. Le résultat du système d'inférence étant de  $G = 0.565$ .

En utilisant (4) nous calculons le nombre optimal de sondages  $N_{\text{opt}}$  pour le projet.

$$N_{\text{opt}} = N_{\text{ref}} * G / G_{\text{ref}} = 18 \times 0.565 / 0.505 = 21 \text{ sondages}$$

Le nombre obtenu est plus petit que le nombre de sondages exécutés sur site, 28 sondages.

En second lieu nous utilisons  $G_{\text{ref}} = 0.201$  la valeur inférieure de l'intervalle  $[0.201, 0.810]$  comme correspondant au nombre minimal de sondages  $N_{\text{ref}}$  recommandé par l'Eurocode7, 1 sondage tous les  $40 \text{m}$ . Nous obtenons pour la surface de ce projet  $N_{\text{ref}} =$

10 sondages. En utilisant encore l'expression (4) nous pouvons prédire le nombre optimal de sondages  $N_{opt}$  pour ce site ;

$$N_{opt} = 10 \times 0.565 / 0.201 = 29 \text{ sondages}$$

Le nombre prédit cette fois est pratiquement le même que le nombre de sondages exécutés sur site donné par Schönhardt et Witt (2003).

En se basant sur les résultats du SIF, en utilisant  $G_{ref} = 0.505$  ensuite  $G_{ref} = 0.201$ , nous avons obtenu une plage de valeurs pour le nombre de sondages à effectuer sur le site entre 21 et 29 sondages.

### ***Exemple 2***

Le même site qu'en section précédente est repris à titre d'exemple pour comparer le résultat du SIF. Les détails du site sont donnés dans la section précédente (Strater and McKown, 2002).

Le résultat de l'application du SIF est donné par  $G=0.546$ . Pour calculer le nombre optimal de sondages  $N_{opt}$  pour ce site, on utilise en premier lieu  $G_{ref} = 0.505$  qui correspond à la « moyenne » des recommandations de l'Eurocode 7 (1 sondage par aire de  $30 \times 30 \text{m}^2$ ). La surface du projet étant de  $6500 \text{m}^2$ , le nombre de sondages de référence  $N_{ref} = 6$ .

En utilisant le résultat  $G$  du SIF pour ce site ainsi que l'expression (4) on calcule le nombre de sondages nécessaires ;

$$N_{opt} = N_{ref} * G / G_{ref} = 6 \times 0.546 / 0.505 = 7 \text{ sondages}$$

En second lieu nous utilisons  $G_{ref} = 0.201$  correspondant au « minimum »  $N_{ref}$  recommandé par l'Eurocode7 pour cette surface du projet (1 sondage par aire de  $40 \times 40 \text{m}^2$ ). Nous trouvons dans ce cas  $N_{ref} = 4$  sondages. Et en appliquant l'expression (4) ;

$$N_{opt} = N_{ref} * G / G_{ref} = 4 \times 0.546 / 0.201 = 12 \text{ sondages.}$$

Le résultat prédit par le Système d'Inférence Floue se situe dans la plage [7, 12] sondages, ce qui est dans les mêmes proportions que ce qui a été proposé par les

ingénieurs en charge de l'investigation géotechnique. Ils ont proposé un nombre de sondages qui s'étale entre 8 et 12 sondages au total.

Si l'on considère le jugement, des ingénieurs en charge de l'étude, fiable alors l'utilisation du système d'inférence floue de manière indépendante a conclu aux mêmes résultats que ce qui a été proposé par ces ingénieurs. Ce résultat montre l'efficacité et la pertinence de la démarche suivie, même si la construction des ensembles flous demande encore beaucoup d'expérience.

Les figures qui suivent ont été tracées pour illustrer le nombre de sondages optimal fonction de différents paramètres d'entrée en faisant augmenter la surface du site d'étude. Une comparaison est proposée lorsqu'on s'appuie sur les minimums de l'Eurocode7. L'évolution du nombre optimal  $N_{opt}$  est très sensible à la variation de la surface de la zone d'investigation. Nous remarquons l'influence des paramètres « géologie » et « complexité de la géologie ». On voit qu'à partir de 10000m<sup>2</sup> (1 hectare) les différences avec l'Eurocode7 sont très importantes. Le coût qui se rapporte à des investigations géotechniques sur de telles surfaces reste très élevé.

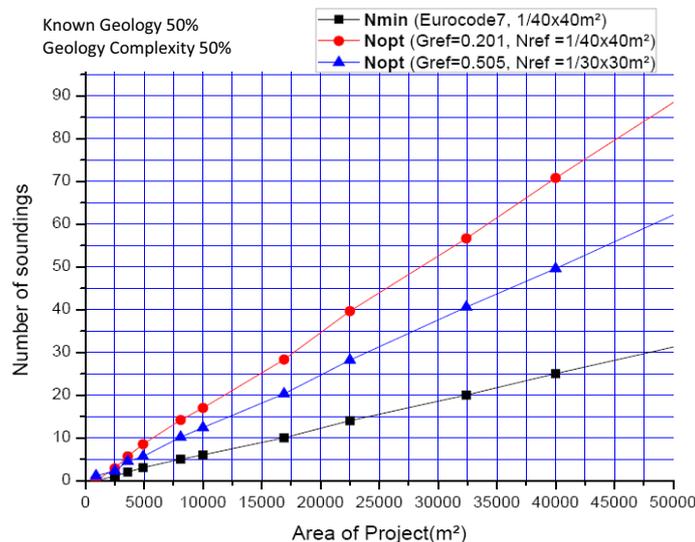


Fig. 4.26 Nombre optimal  $N_{opt}$  de sondages en utilisant le SIF - Comparaison selon  $N_{ref}$  ("Known-Geology" 50% et "Geology Complexity" 50%)

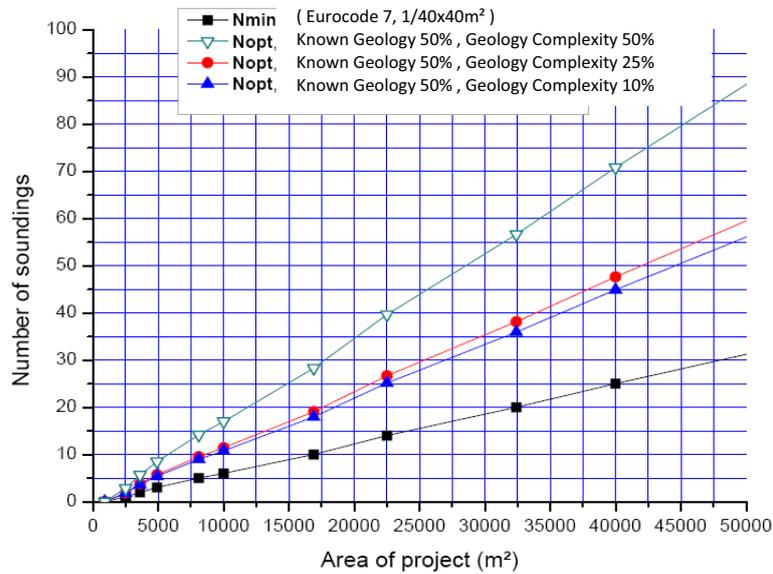


Fig.4.27  $N_{opt}$  comparé à  $N_{min}$  (Eurocode7) Influence de “Known-Geology” 50% et “Geology Complexity” 10%, 25%, 50%)

## CONCLUSION

Un Système d’Inférence Floue a été développé pour tenir compte des incertitudes qui surviennent durant une campagne d’investigation géotechnique. L’idée principale est de reproduire le raisonnement de l’ingénieur pour évaluer le nombre de sondages nécessaires à une caractérisation fiable du sol. Différents paramètres intervenant dans ce genre de campagne doivent être pris en considération. L’information sur la géologie du site est une part importante. La nature du projet à construire et la topographie du site affectent la densité des sondages à effectuer. Les ensembles flous ont été utilisés pour représenter les paramètres de caractérisation du site avec la possibilité de considérer une information qualitative et linguistique. Ils permettent également de tenir compte des incertitudes qui existent dans ces paramètres. Le système d’inférence floue mis en place consiste en un groupe de paramètres d’entrée comme nous l’avons mentionné, dont la géologie, la topographie, etc. et des paramètres de sortie (output) que nous avons exprimé comme une densité de sondages sur site. Chaque paramètre d’entrée contribue au poids de la décision finale. Le système d’inférence floue assemble toutes les influences et les défuzzifie en une valeur fixe, entre 0 et 1, représentant une densité

(disposition) de sondages à compléter sur site. Les cas présentés montrent l'effet des différents paramètres, et révèlent l'efficacité des ensembles flous utilisés pour représenter les paramètres de caractérisation de site. Le système d'inférence considère l'influence de chaque paramètre individuellement et calcule une densité optimale globale de sondages par rapport à un minimum recommandé par des codes de pratique.

Le résultat est donné sous forme de poids, indiquant la décision que l'ingénieur aura à prendre. Les recommandations disponibles (FHWA, 2002 ; Simons et al., 2002) donnent des indications sur le nombre de sondages requis pour caractériser un site, mais elles ne dépendent que des dimensions du projet à construire.

Dans une première approche (I) nous avons tenu compte du fait qu'un certain degré de confiance dans le SIF permet de relier, pour des cas connus, la densité (résultat)  $G$  à un nombre « optimal »  $N_{opt}$  de sondages. Le poids  $G_{min}$ , correspondant au nombre « minimal »  $N_{min}$  de sondages recommandé par les documents techniques, est alors déduit et utilisé plus tard en d'autres sites pour calculer le nombre de sondages qui nous intéresse.

Une seconde approche (II) a été également proposée, en calibrant un certain  $G_{ref}$  avec les recommandations  $N_{ref}$  des codes de pratique (Eurocode7, FHWA), ce qui permet de calculer directement le nombre de sondages optimal  $N_{opt}$  pour un site quelconque. Cette approche est différente de la première. Il n'est pas nécessaire, d'appliquer le SIF sur des cas connus pour pouvoir prédire  $N_{opt}$  sur de nouveaux sites.

Les exemples traités montrent que le Système d'Inférence Floue peut être utilisé comme un outil systématique d'aide à la décision pour les ingénieurs lorsqu'ils traitent de la caractérisation géotechnique de site. Ce système d'inférence est une étape qui vient au-delà des recommandations techniques sur le nombre « minimum » de sondages tel que spécifié par certains codes de pratique. Le système d'inférence floue indique à l'ingénieur si plus d'un nombre minimum, de sondages, est requis. Cependant, si on adopte la démarche I le poids  $G_{min}$ , à utiliser comme valeur standard, doit être calibré sur beaucoup de projets connus.

La démarche II quant à elle se passe de ce  $G_{min}$  à tirer de plusieurs cas, elle permet de quantifier de manière fiable et cohérente le nombre de sondages en se basant sur une

valeur de  $G_{ref}$  calibrée avec les règlements (Eurocode7, FHWA). Les résultats obtenus à partir des applications, sont très encourageants et peuvent servir aisément l'ingénieur lors d'une investigation géotechnique.

# CHAPITRE 5

# 5

## ANALYSE DE LA DECISION EN FONCTION DES PARAMETRES D'ENTRÉE DU SYSTEME D'INFERENCE FLOU

### INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment utiliser les ensembles flous pour construire un Système d'Inférence permettant d'estimer le nombre optimal de sondages à exécuter sur un site lors d'une investigation géotechnique pour des projets communs.

Le résultat est donné sous forme de poids  $G$  entre 0 et 1. Une première approche a été utilisée pour transformer le résultat obtenu en un nombre de sondages. Cette approche est basée sur le degré de confiance que l'on place dans le SIF arguant qu'il représente de manière suffisante la réalité du terrain. Le résultat  $G$  est la conséquence de l'influence de plusieurs paramètres d'entrée pris en compte dans l'analyse. L'influence de chacun des paramètres sur  $G$  dépend des règles floues utilisées et de la manière de les exprimer, de la méthode d'agrégation et de la technique de défuzzification. Le schéma de Mamdani (Min-Max) a été utilisé dans l'agrégation et la méthode du centroid pour calculer le résultat final. Nous avons vu aussi qu'on pouvait utiliser une seconde approche qui combine un certain poids  $G_{ref}$  avec les recommandations des documents techniques (Eurocode7, FHWA), et il a été montré la possibilité de déduire un nombre optimal de sondages.

Dans ce chapitre nous explorerons la manière avec laquelle les résultats varient en fonction d'un, deux ou plusieurs paramètres d'entrée. Nous exposerons aussi la manière d'exprimer les règles floues et leur influence sur les résultats.

### INFLUENCE DES PARAMETRES D'ENTRÉE SUR LA DENSITE

Les paramètres d'entrée pris en compte sont:

- La topographie du site (pente)
- L'information sur la géologie du site.
- La complexité de la géologie locale
- Le type de projet
- La similarité des résultats préliminaires (variabilité)
- La similarité des résultats préliminaires avec ceux des sites avoisinants
- Les zones de chargement spécifiques (aire).

### **5.1 INFLUENCE DES PARAMETRES D'ENTREE SEPAREMENT**

Dans cette partie nous montrons l'influence de chaque paramètre d'entrée sur le poids de la décision G (densité de sondages sur site). Un certain nombre de courbes a été tracé. Les règles floues ont été enclenchées pour chaque paramètre pris individuellement ; ce qui implique que les autres règles ne sont pas fonctionnelles dans ce cas. La figure 5.1, par exemple, montre la variation de la densité des sondages en fonction de la topographie du site. Seules les règles floues impliquant la « topographie » sont déclenchées. Nous pouvons noter que les valeurs de G sont incluses entre un minimum de 0.20, lorsque la pente est inférieure à 10°, et un maximum de 0.81 pour des pentes supérieures à 40°.

Dépendant des règles enclenchées dans chaque cas pour les autres paramètres, chacun séparément, nous avons noté les mêmes allures de courbe représentant la densité des sondages G. La figure 5.2 illustre cette situation, elle montre l'évolution de G en fonction de la géologie (degré d'information géologique) qui varie entre 0 et 100%. Nous observons que la courbe dépend des valeurs du degré d'information géologique. Les valeurs limites de G sont 0.20 au moins et 0.81 au plus lorsque la « Géologie » prend des valeurs plus faibles que 10%.

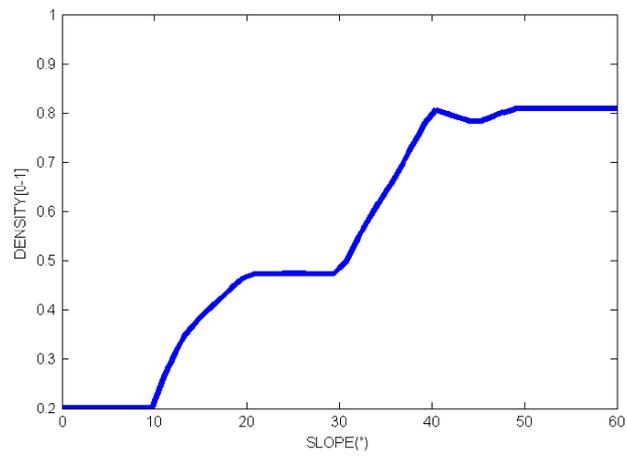


Fig5.1 9 Densité / Topographie (Pente)

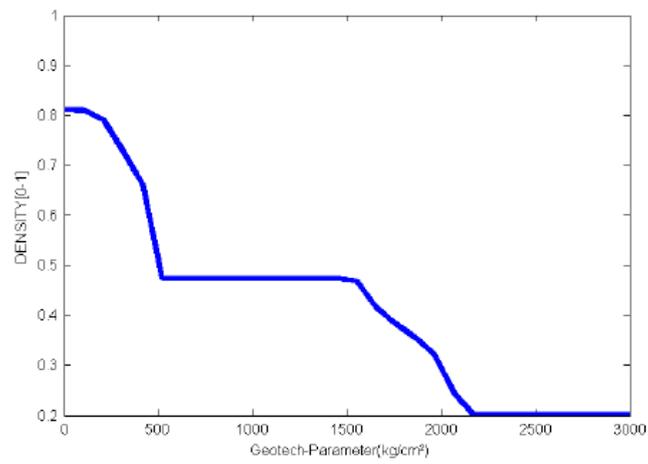


Fig5.2 10 Densité / Paramètres Géotechniques (kg/cm²)

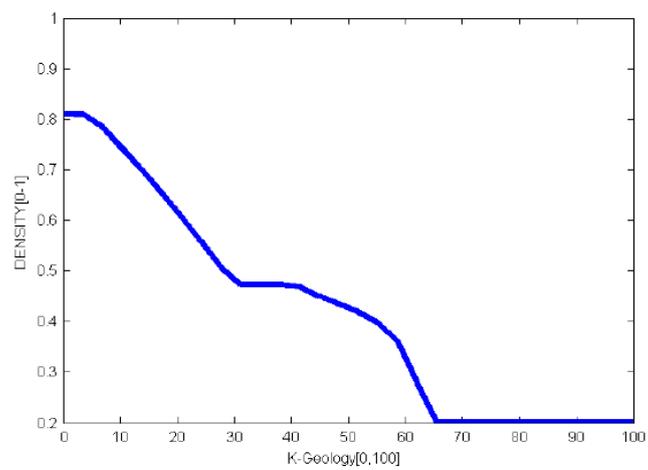


Fig 5.3 Densité/ Géologie

Lorsque les règles n’incluent que l’information sur la “Géologie”, quand elles sont déclenchées nous obtenons la courbe de la figure 5.4. Pour une géologie dont l’information est classée « inconnue » les valeurs de G atteignent un maximum de 0.81, tandis que si la géologie était « bien connue » la valeur de la densité G va décroître jusqu’à atteindre 0.20 la valeur minimale.

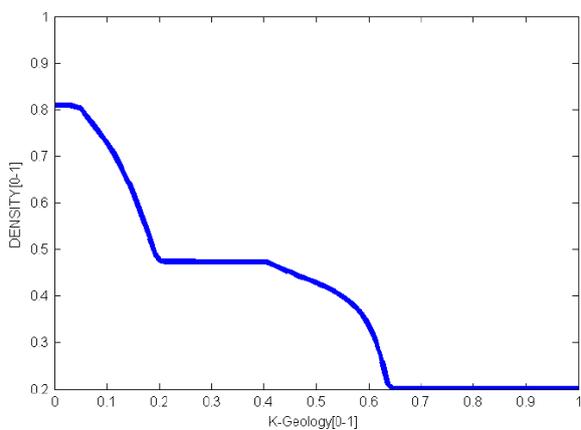


Fig 5.4 Densité VS Géologie

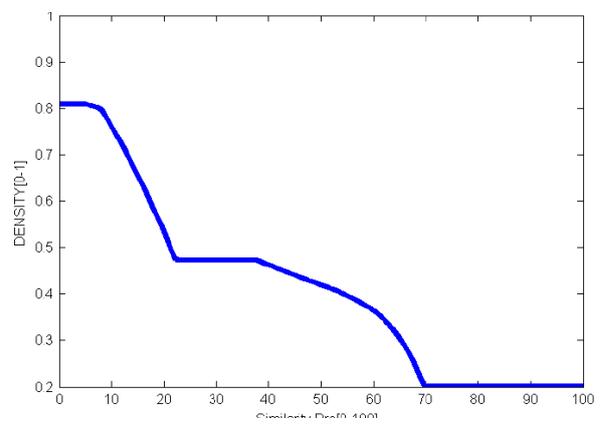


Fig 5.5 Densité VS Similarité résultats préliminaires

Les règles ont été enclenchées pour d’autres paramètres d’entrée du système et nous avons remarqué les mêmes allures des courbes à chaque situation et les valeurs limites de G sont toujours incluses entre 0.2 et 0.81. Ces courbes montrent que lorsqu’un paramètre d’entrée est pris séparément, son influence sur la décision a le même effet que tout autre paramètre. Les courbes ne sont, évidemment, pas identiques mais leurs plages de valeurs sont dans les mêmes proportions. Les courbes sont continues et varient de manière régulière ; elles reflètent un comportement logique obtenu des règles prises en considération. L’intervalle de variation de G est balayé par l’ensemble des valeurs de 0.20 à 0.81.

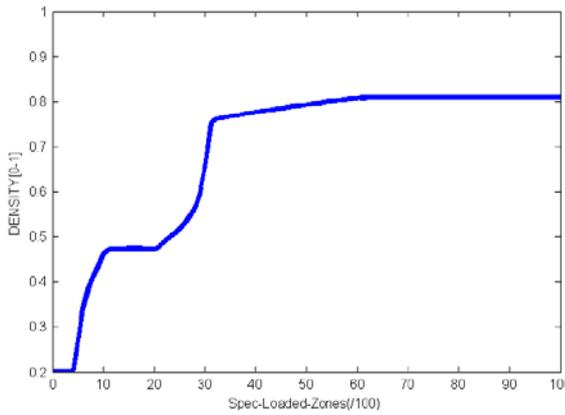


Fig 5.6 Densité / Zones de chargement spécifiques

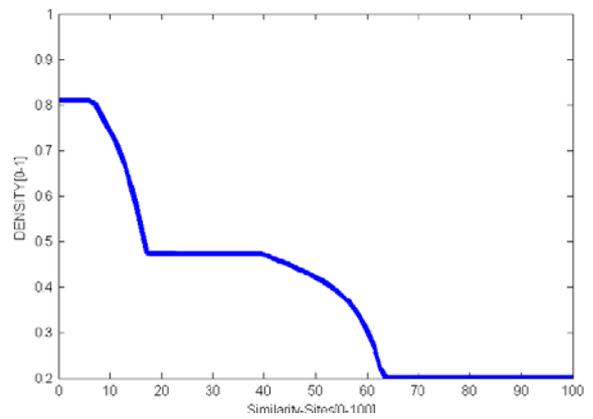


Fig 5.7 Densité / Similarité avec sites voisins

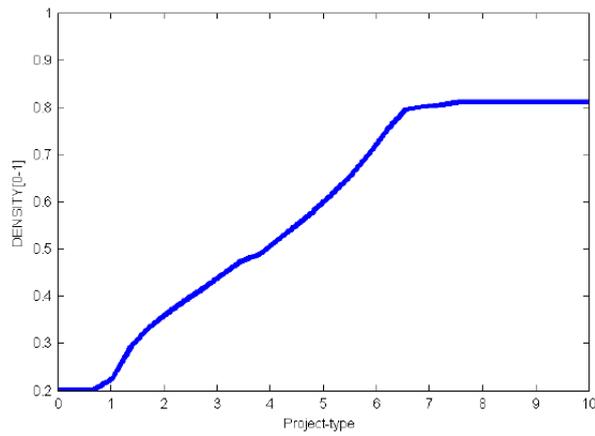


Fig 5.8 Densité / Type de projet

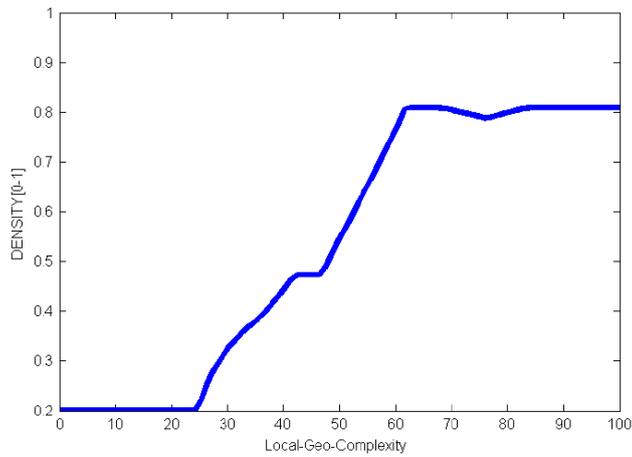


Fig 5.9 Densité / Complexité de géologie locale (%)

## 5.2 INFLUENCE DE DEUX PARAMETRES SUR LA DECISION

Dans cette section on s'intéresse aux courbes surfaces représentant la densité G en fonction de deux paramètres d'entrée. Seules les règles incluant les deux paramètres en question ont été enclenchées. Dans la figure 5.10 par exemple nous pouvons noter l'influence de la « Topographie » et de la « Complexité de la géologie locale » sur la densité des sondages sur site. Seules les règles utilisant ces deux paramètres ont été prises en compte pour la simulation, les autres n'ont pas été déclenchées. Nous observons que les limites des surfaces obtenues n'ont pas changé ; elles sont toujours dans la plage [0.20, 0.81]. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le poids G de la décision ne dépend que des deux paramètres pris ensemble, ce qui est suffisant pour tracer une surface totale des valeurs de G. Il n'y a pas de troisième paramètre à fixer et qui influencerait sur les valeurs de sortie. Les courbes évoluent logiquement, en croissance et décroissance continuellement et en accord avec les règles linguistiques et le raisonnement utilisés par l'ingénieur.

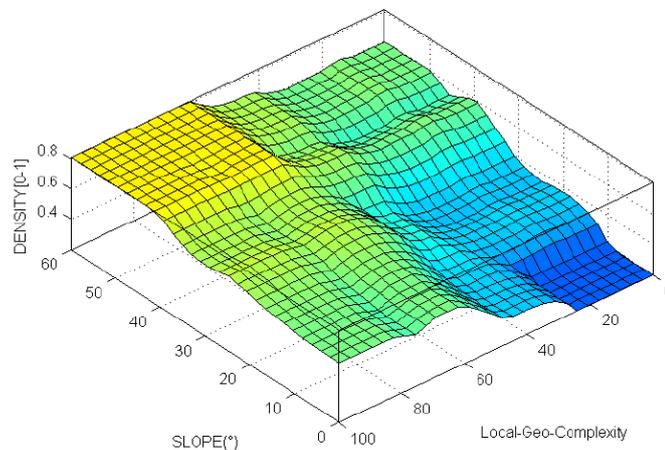


Fig 5.10 Surface de G fonction de Pente et de Complexité Géologie locale

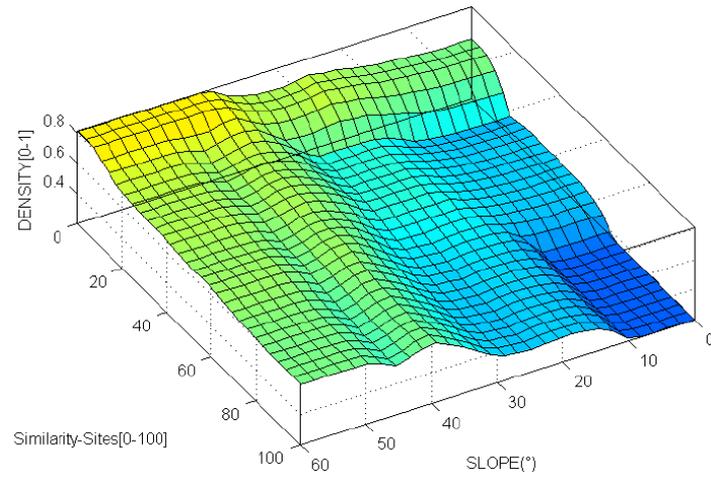


Fig 5.11 Surface / Pente et Similarité sites voisins

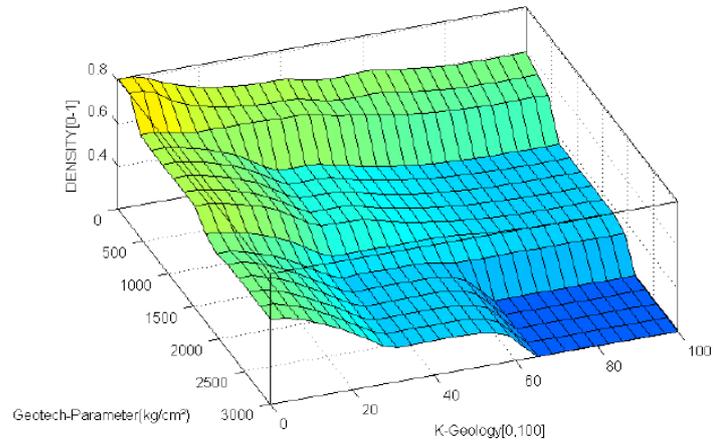


Fig 5.12 Surface / Paramètres Géotechniques (kg/cm<sup>2</sup>) et Géologie (%)

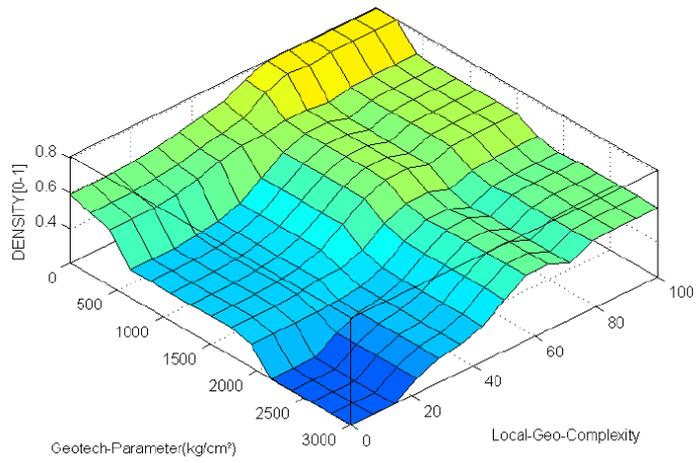


Fig 5.13 Surface / Paramètres Géotechniques ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) et Complexité géologie locale (%)

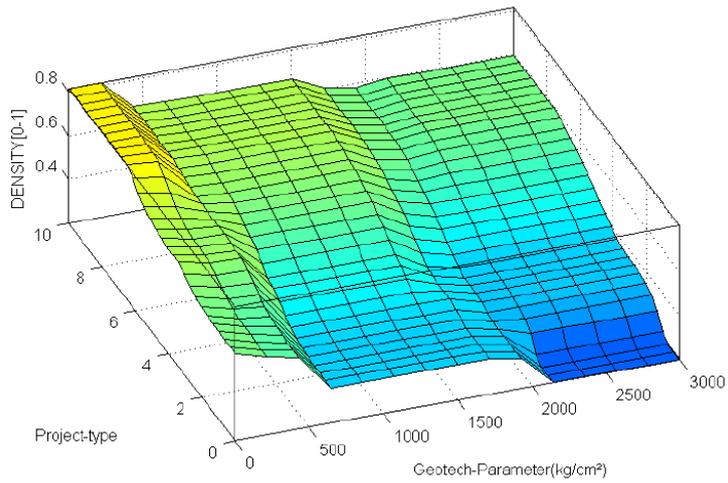


Fig 5.14 Surface / Paramètres Géotechniques ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) et Type de projet

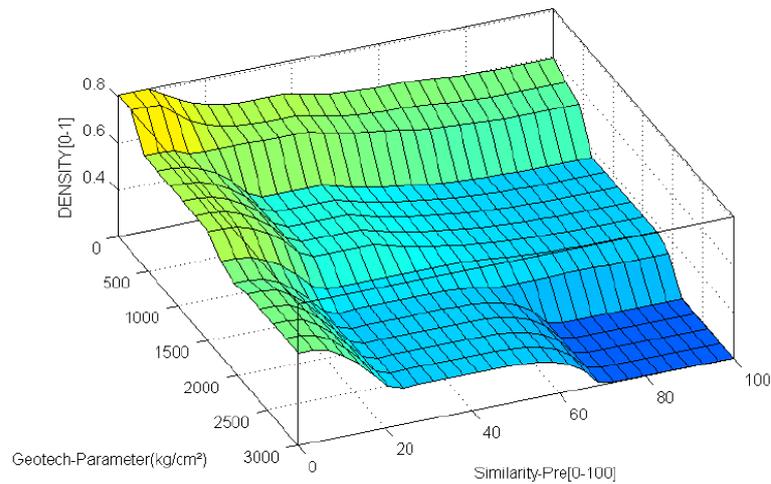


Fig 5.15 Surface / Paramètres Géotechniques (kg/cm<sup>2</sup>) et Similarité (%)

Les surfaces dessinées nous informent, pour différents paramètres pris en compte, sur la distribution de la densité des sondages. Nous confirmons, d'après les figures, quelques différences. Dans la figure 5.10 par exemple, lorsque la « complexité géologique » varie la surface de G occupe une large part de valeurs supérieures à 0.6 en général et atteint la valeur maximale  $G=0.81$ . Comparée à la surface de la figure 5.11, nous remarquons qu'elle occupe une plus grande aire de valeurs de G supérieures à 0.6. Ces surfaces indiquent les interactions qui existent entre deux paramètres d'entrée ainsi que leurs influences sur la densité des sondages. Une topographie à pente « importante » associée à une géologie locale « complexe » impliqueront une densité de sondages G importante comme on le remarque en figure 5.10, tandis que si la géologie n'est « pas complexe » et les pentes faibles nous aurons une faible densité de sondages.

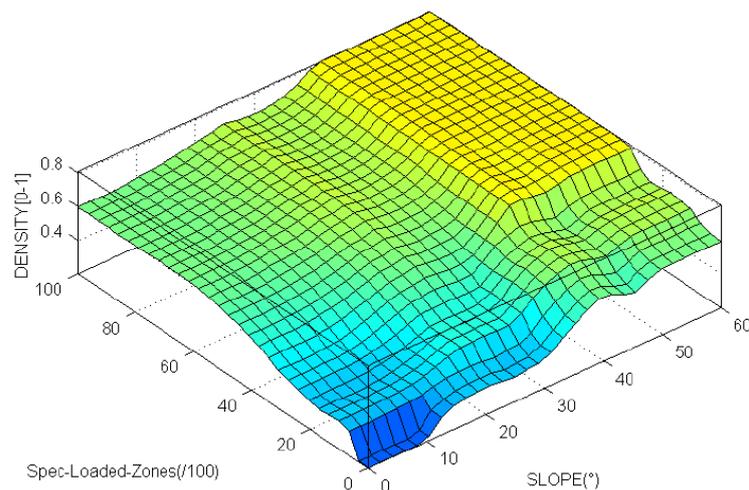


Fig 5.16 Surface / Topographie et Zones de chargements spécifiques

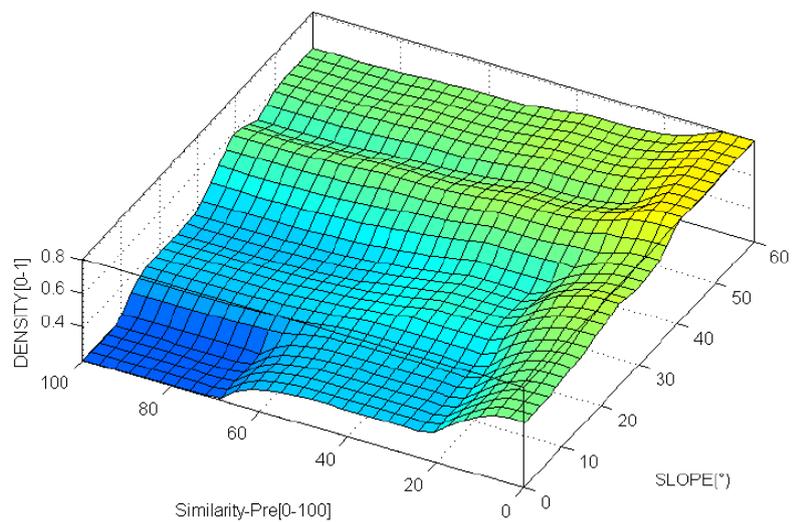


Fig 5.17 Surface /Topographie et Similarité

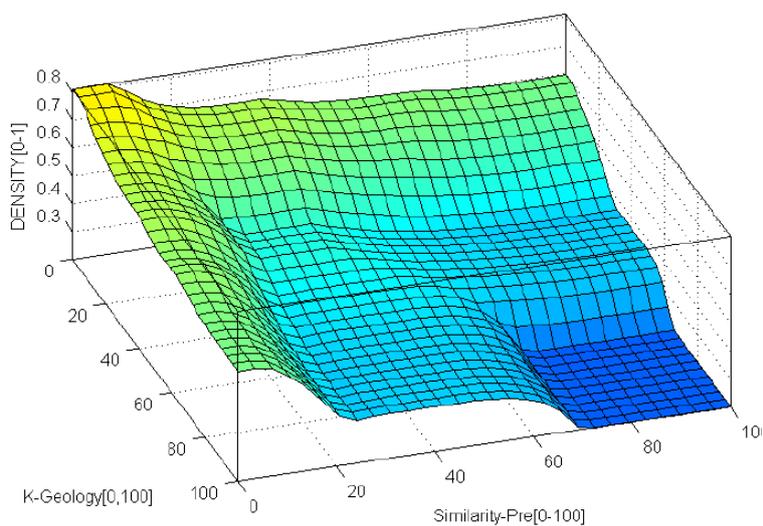


Fig 5.18 Surface / Géologie et Similarité (%)

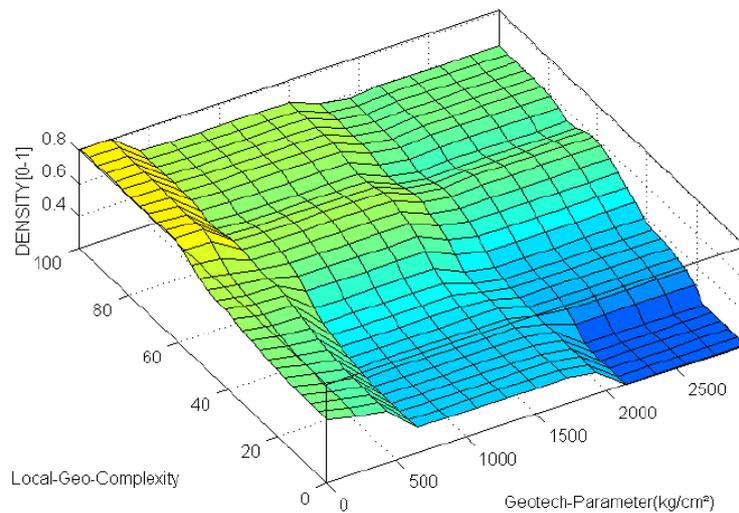


Fig 5.19 Surface / Complexité Géologie locale et Paramètres Géotechniques

Nous remarquons les mêmes formes de surface dans les figures 5.14 à 5.17, les valeurs maximale et minimale de G sont toujours les mêmes que pour les premières courbes à un seul paramètre, c'est-à-dire dans l'intervalle [0.20, 0.81]. Rappelons que pour chaque surface nous n'avons utilisé que deux paramètres d'entrée uniquement, les règles floues sur le reste des paramètres n'ont pas été enclenchées.

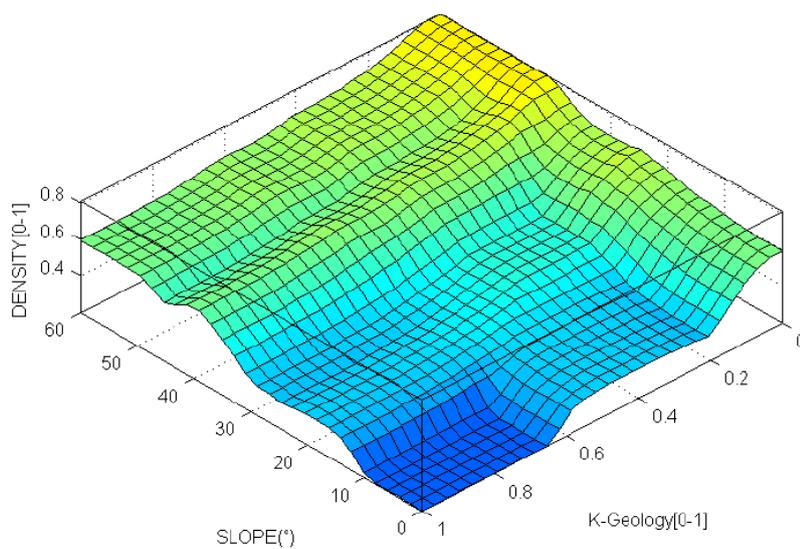


Fig 5.20 Surface / Pente et Géologie

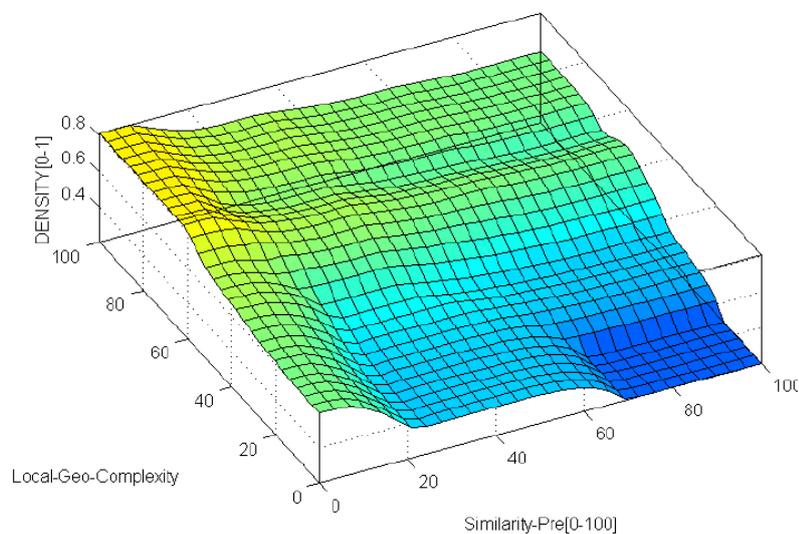


Fig 5.21 Surface / Complexité géologie locale et similarité (%)

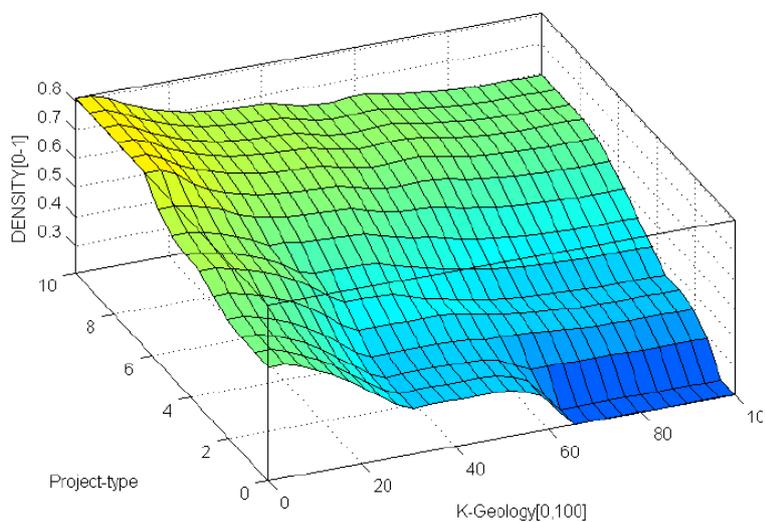


Fig 5.22 Surface / Type de projet et Géologie

Lorsque les paramètres “géologie” et “topographie” sont pris en considération fig5.20 pour montrer leur influence sur G, nous remarquons que les valeurs de la densité sont en général comprises dans la plage [0.4, 0.65], elles atteignent le maximum 0.81 sur une

petite partie lorsque la géologie est "Inconnue" et la pente (topographie) « très importante » ; aussi les valeurs minimales de  $G=0.20$  sont confinées dans une petite aire correspondant à une géologie entre 60 et 100% et une pente variant entre  $0^\circ$  et  $10^\circ$ .

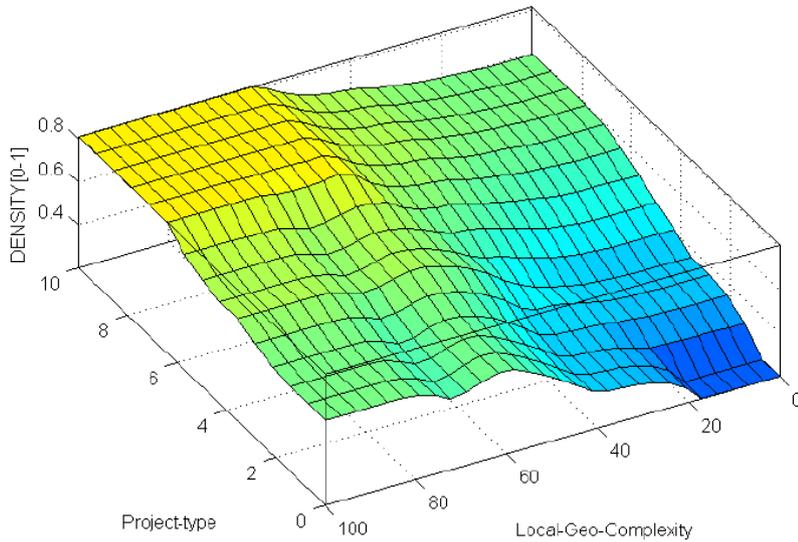


Fig 5.23 Surface / Type de Projet et Complexité Géologie Locale

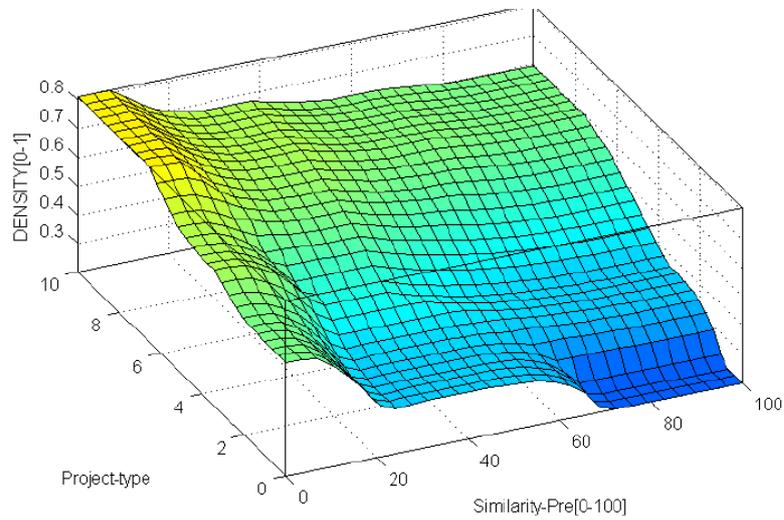


Fig 5.24 Surface / Type de projet et Similarité

En figure 5.24 nous remarquons deux paliers de valeurs de  $G$ , l'un autour de 0.4 régulier et un autre variant entre 0.4 et 0.65. Le niveau maximum 0.81 est confiné dans une petite surface, ainsi que  $G=0.2$  qui reste limité dans l'espace.

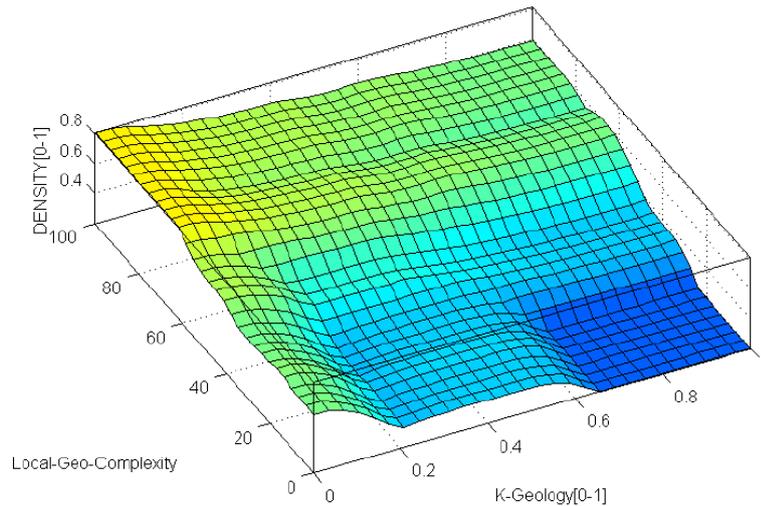


Fig 5.25 Surface de G /Géologie et Complexité Géologie locale

Dans les figures suivantes on représente également l'influence d'autres paramètres d'entrée sur la densité G. Pareillement à ce qui a précédé seules les règles concernant les deux paramètres d'intérêt sont prises en compte, les autres n'ont pas été déclenchées. Différentes formes de surface ont été obtenues dépendant des ensembles flous constituant chacun des paramètres ainsi que leurs règles d'inférence. Comme les deux paramètres sont pris indépendamment, les valeurs de G sont incluses dans toutes les situations entre [0.20, 0.81].

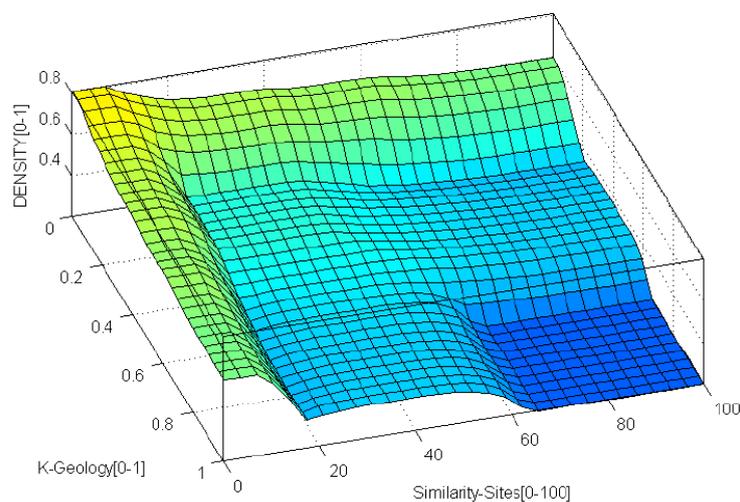


Fig 5.26 Surface G/Géologie et Similarité sites voisins

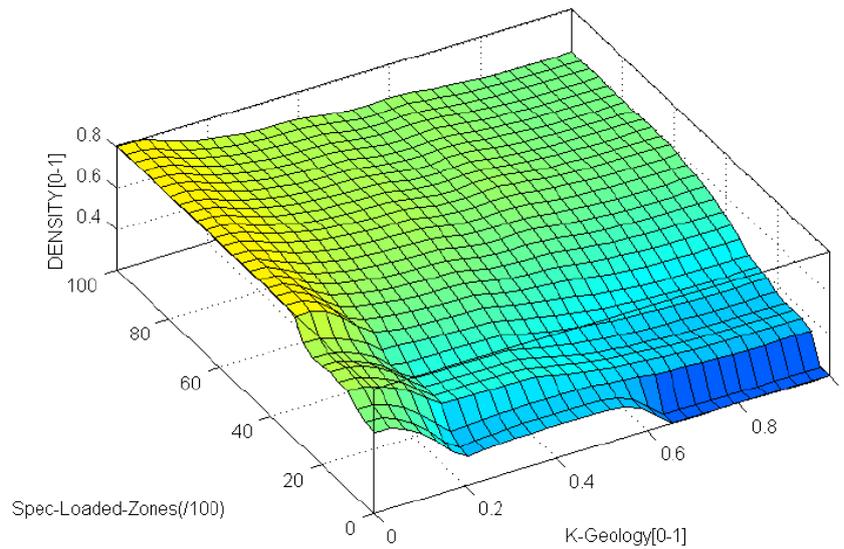


Fig 5.27 Surface G /Zones de chargement spécifique et Géologie

Cette représentation des résultats sous forme de surfaces, aide l'ingénieur dans la prise de décision et l'analyse, les figures servent aussi à mieux connaître l'influence des paramètres sur le nombre de sondages à effectuer. Les formes, telles que nous les avons discutées auparavant, dépendent du type d'ensembles flous utilisés et de la formulation des règles d'inférence. Les surfaces représentent l'influence sur la décision de deux paramètres pris seuls ; Dans tous les exemples présentés, ces surfaces évoluent selon les cas.

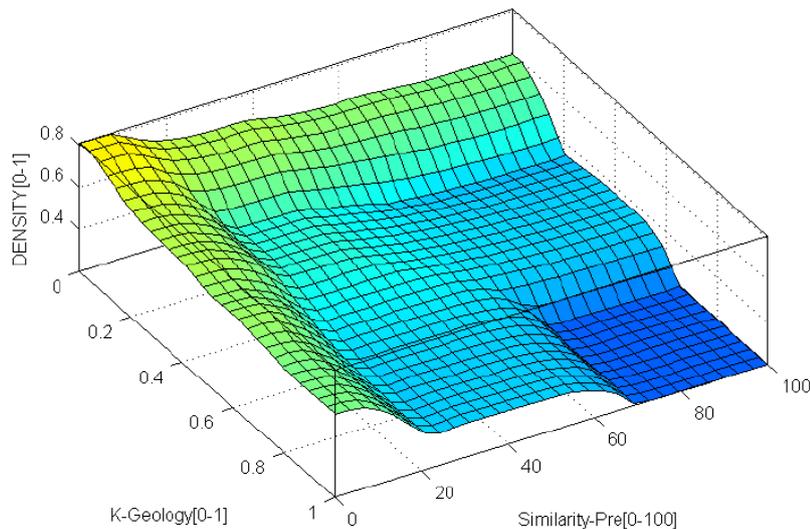


Fig 5.28 Surface/ Géologie et Similarité

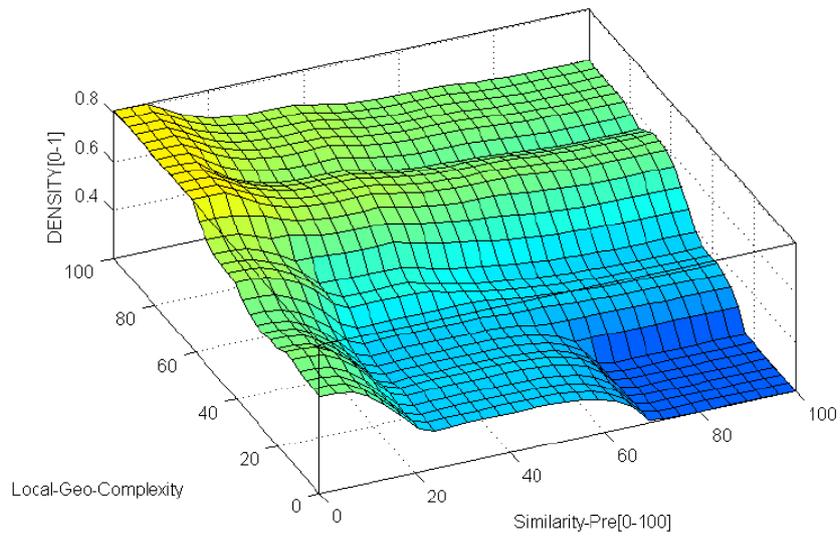


Fig 5.29 Surface /Complexité géologie locale et Similarité

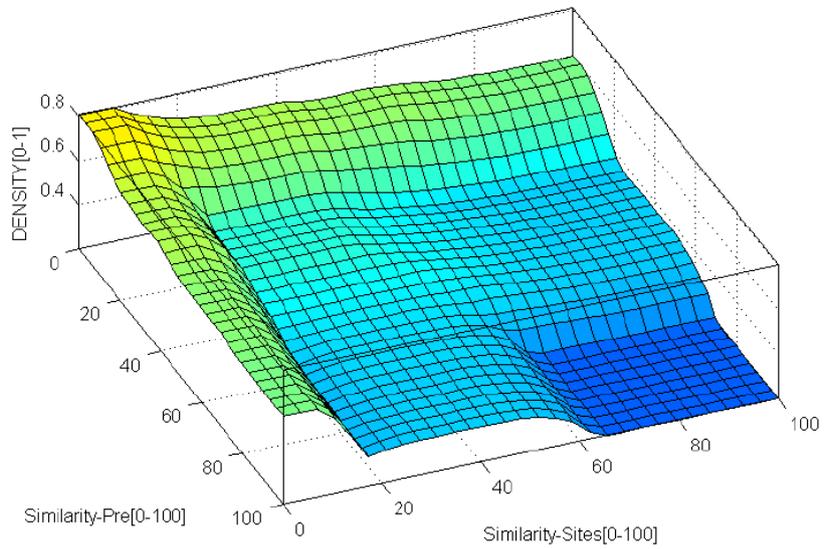


Fig 5.30 Surface / Similarité sites voisins et similarité résultats préliminaires

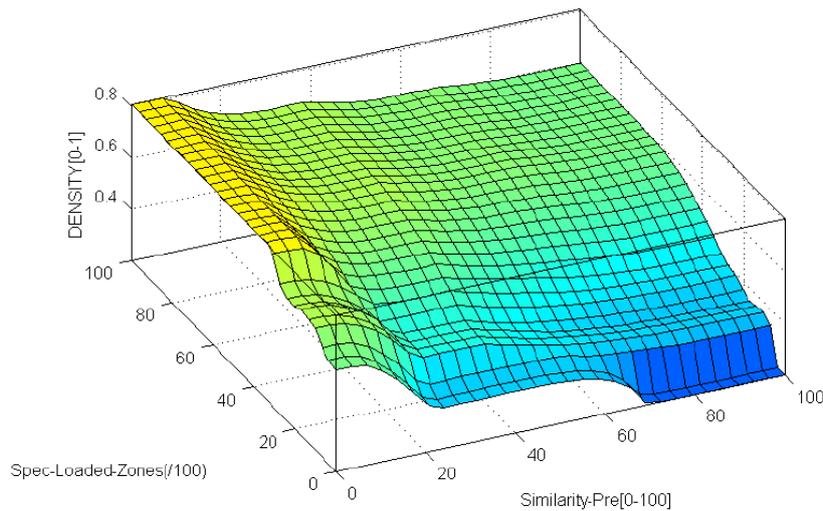


Fig 5.31 Surface / Zones de chargement spécifique et Similarité

Cette représentation sous forme de surface reste un moyen adéquat pour illustrer l'influence des paramètres et montrer que dans le cas où deux d'entre eux sont considérés, les limites de G restent toujours comprises entre les valeurs, minimale 0.20 et maximale 0.81. Nous avons également vu que lorsqu'un seul paramètre d'entrée est pris en considération on obtient une courbe de G de formes régulières, évoluant en accord avec les règles floues prise en compte. Les limites maximale et minimale restent dans l'intervalle [0.20, 81].

### 5.3 INFLUENCE DE TROIS PARAMETRES SUR LA DECISION

#### *a) Exemple "Géologie", "Type de projet" et " Paramètres géotechniques"*

Les figures qui suivent illustrent la situation lorsqu'on prend en compte plus de deux (2) paramètres d'entrée pour le système. Les surfaces sont tracées avec deux paramètres en abscisses (axes x, y) et la densité des sondages G en ordonnées (axe z), les autres paramètres seront pris fixes. Pour trois paramètres d'entrée par exemple, deux seront variables et il nous faudra fixer le troisième pour pouvoir tracer la surface de G. On prend l'exemple de la « géologie», « Type de projet » et « paramètres géotechniques» comme input, et on cherche l'influence de deux parmi ces trois facteurs sur la densité G.

La surface de G a été tracée pour « Type de projet » et « Paramètres Géotechniques », l'information sur la « Géologie » étant maintenue constante (Figs 5.32, 5.33, 5.34). Notons que seules les règles floues relatives à ces trois paramètres sont enclenchées, donc seules la « géologie », les « paramètres géotechniques » et le « type de projet » influencent la densité des sondages G à effectuer sur site.

Les figures mettent en évidence l'évolution de la surface de décision lorsqu'on fait varier les « paramètres géotechniques » du site et le « type de projet » pour une « information géologique » donnée. Nous remarquons que la forme de la surface évolue en fonction de l'information « géologique » dont on dispose. En fig 5.32. La surface du pic n'est pas large et atteint des valeurs importantes supérieures à 0.75 remarquables pour des projets importants avec des caractéristiques géotechniques de sol relativement faibles. Un palier élargi est perceptible pour des valeurs de G inférieures à 0.70 avec des niveaux différents pour différentes valeurs des paramètres géotechniques. Il suffit d'avoir plus d'information géologique (autour de 20%) pour noter qu'en fig 5.33 les valeurs supérieures de G diminuent jusqu'à 0.70 et s'étalant sur une surface relativement plus grande qu'en fig 5.32. Et lorsque l'information sur la géologie devient appréciable (K-Geo=60%) comme on le voit en fig 5.34, la surface tracée prend une forme plus étalée avec des valeurs maximales ne dépassant pas 0.65. Une surface moyenne de G=0.60 est notable pour des paramètres géotechniques supérieurs à 500kg/cm<sup>2</sup> lorsque le type de projet est « important ».

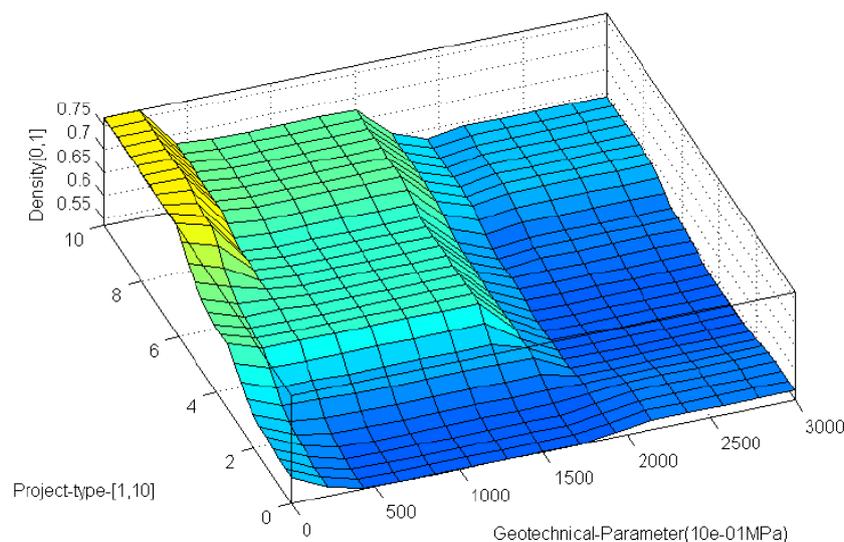


Fig 5.32 Surface / Type de projet et Paramètres géotechniques, Géologie=10%

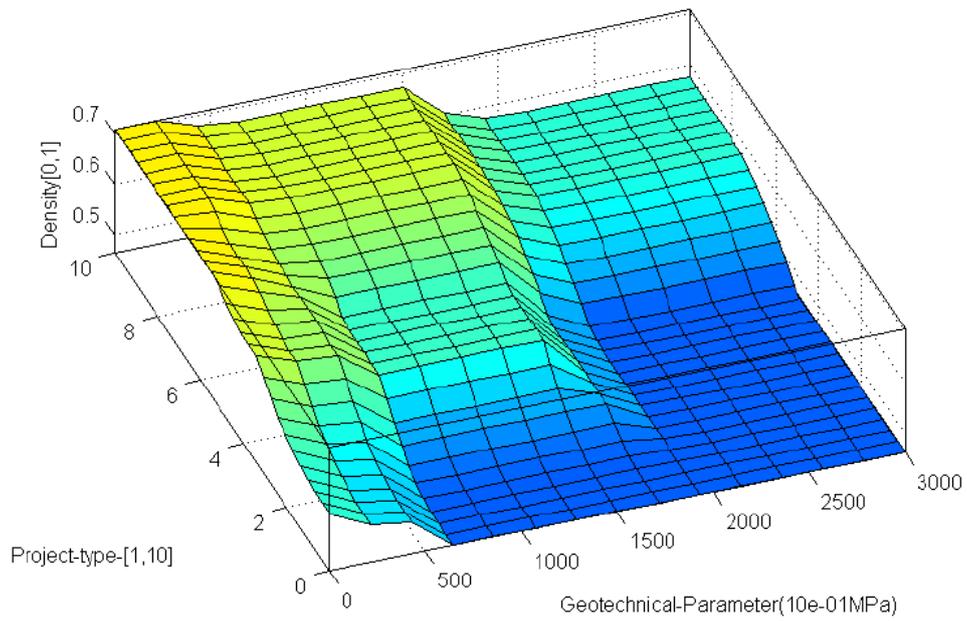


Fig 5.33 Surface / Type de projet et Paramètres géotechniques  
Géologie = 20%

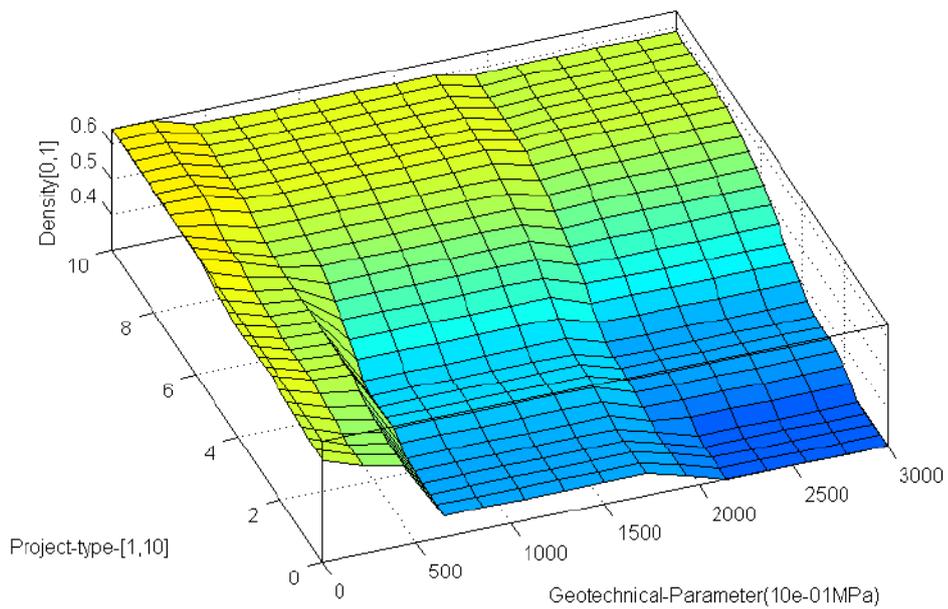


Fig 5.34 Surface / Type de projet et Paramètres géotechniques  
Géologie = 60%

Les formes de surface obtenues, lorsque d'autres paramètres sont considérés, sont indiquées dans les figures qui suivent. La «géologie» combinée au « type de projet », influencent la forme de la surface (décision) selon les valeurs fixées des « paramètres géotechniques ». Ainsi en figA(5.35) le maximum des valeurs de G atteint 0.81 sur une petite portion (surface) lorsque les « paramètres géotechniques » ont des valeurs autour de 100kg/cm<sup>2</sup>

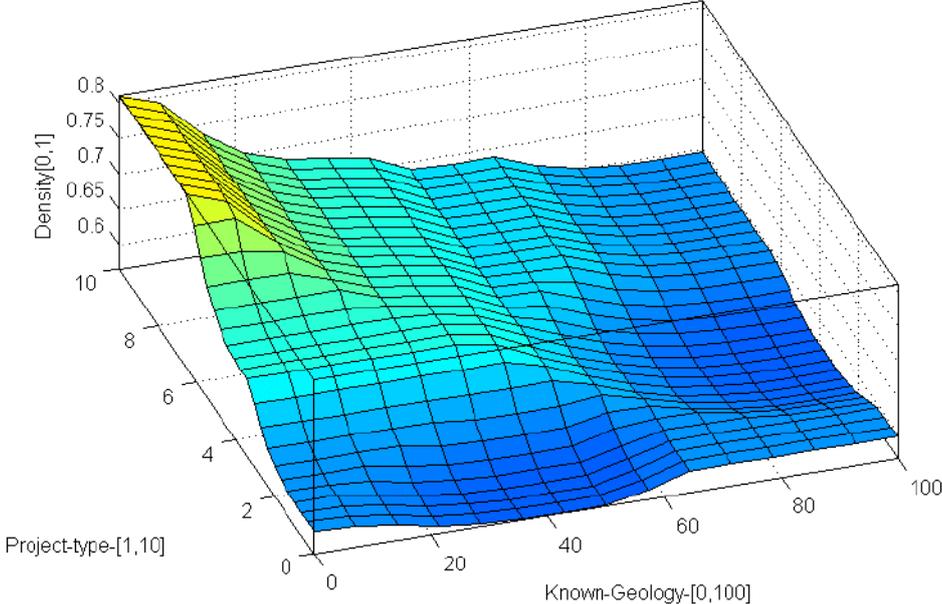


Fig 5.35 Surface / Type de projet et Géologie  
Paramètres géotechniques = 100 kg/cm<sup>2</sup>

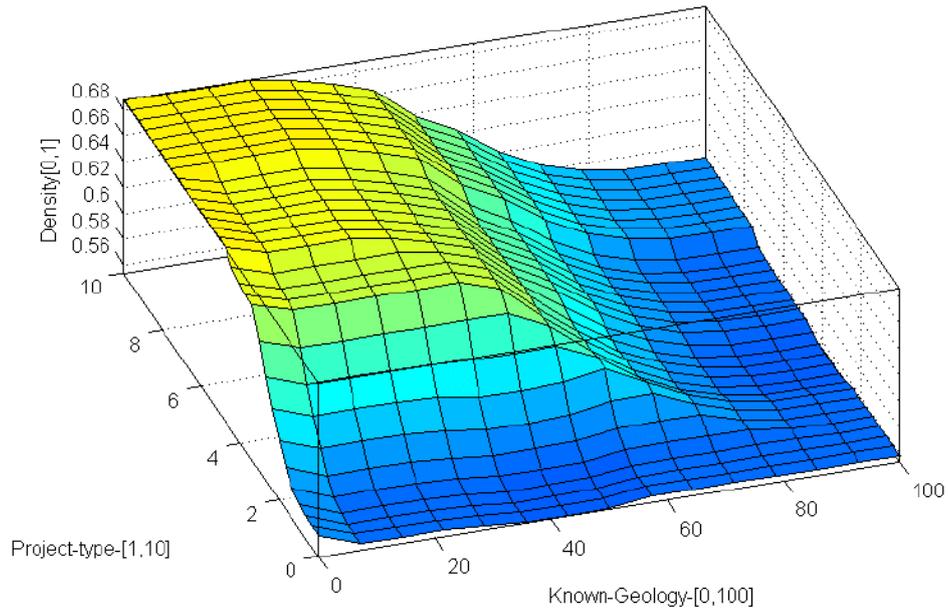


Fig 5.36 Surface / Type de projet et Géologie  
Paramètres géotechniques = 400 kg/cm<sup>2</sup>

Tandis qu'en fig (5.36) et (5.37) lorsque les paramètres géotechniques du site sont appréciables (400 et 1000kg/cm<sup>2</sup>) les surfaces sont plus étalées avec des valeurs maximales de G moins importantes ne dépassant pas 0.69 en figB(5.36) et 0.65 en figC(5.37). Les formes des surfaces sont différentes lorsqu'on passe de B à C.

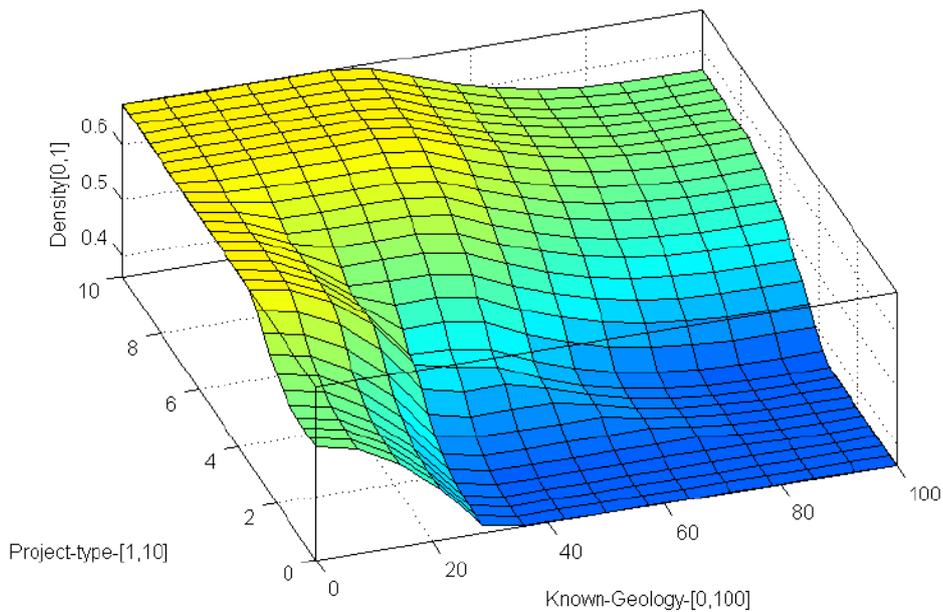


Fig 5.37 Surface / Type de projet et Géologie  
Paramètres géotechniques = 1000 kg/cm<sup>2</sup>

Quant à la figure 5.38, pour des paramètres géotechniques importants ( $2000\text{kg}/\text{cm}^2$ ) on remarque que les valeurs maximales sont encore moins prononcées avec une surface différente et plus étalée pour des projets « importants », le plafond de G atteint 0.56 sur un large palier, pour des types de projets importants quelque soit l'information géologique. La pente de la surface est importante lorsqu'on passe à des types de projets « moyens », la variation est significative dans ce cas, elle passe de  $G=0.55$  à environ 0.35.

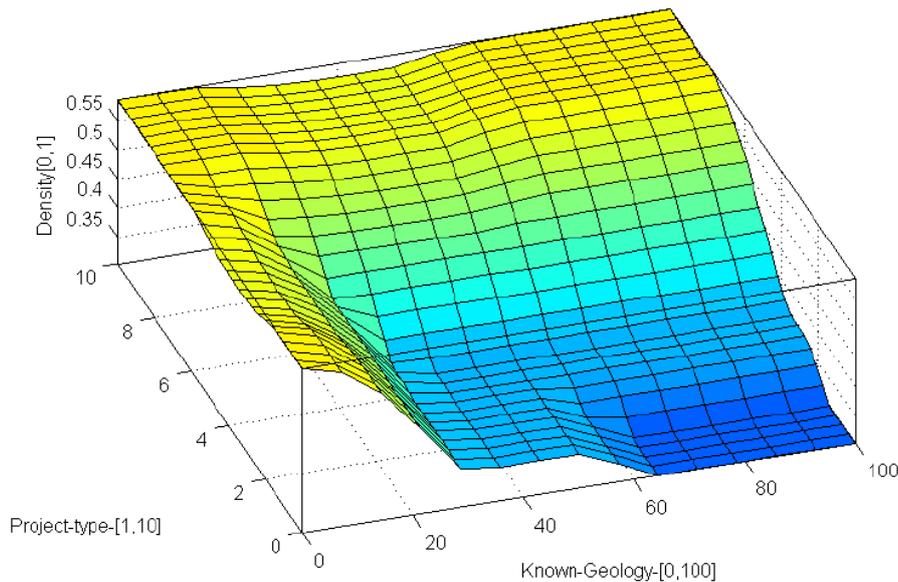


Fig 5.38 Surface / Type de projet et Géologie  
Paramètres géotechniques =  $2000\text{kg}/\text{cm}^2$

***b) Example of “Known-Geology”, “Local geology complexity” and “Similarity – adjoining sites”***

Dans les figures 5.39 à 5.42 nous représentons aussi des courbes de G, basées sur trois paramètres différents ainsi que leur influence sur la densité. La «géologie», «complexité de la géologie locale» et la «similarité-avec sites voisins» sont pris comme les seuls paramètres pour exécuter le système d'inférence floue. Seules les règles floues qui leur sont associées ont été déclenchées. La «similarité» est prise constante et la surface de G est alors tracée en faisant varier la «géologie» et la «complexité – géologie locale».

Nous observons sur la figure 5.39 que pour de faibles «similarités» autour de 5% la forme de la surface est variable et les plus grandes valeurs de G sont confinées dans une

petite zone mais elles atteignent la valeur maximale  $G=0.81$ . Lorsque le degré de similarité est jugé important (figs 5.41, 5.42) dépassant les 50%, la courbe surface tracée change et s'étale plus, mais ses valeurs supérieures diminuent. Pour une « similarité » autour de 50% les valeurs supérieures de  $G$  tournent autour de 0.65, l'étendue de ces valeurs (en jaune) est plus grande et s'étale plus largement qu'en figure 5.39. Les valeurs en question diminuent plus lorsque la « similarité » devient supérieure à 70% pour atteindre des  $G$  autour de 0.60.

Similarity-Sites 5%

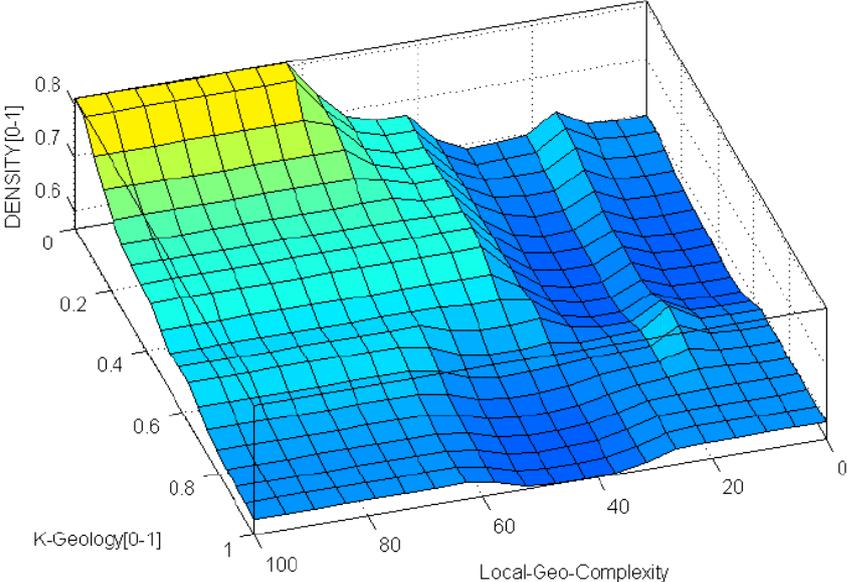


Fig 5.39 Surface / Géologie et Complexité Géologie Locale (Similarité Sites voisins 5%)

Similarity-Sites = 30%

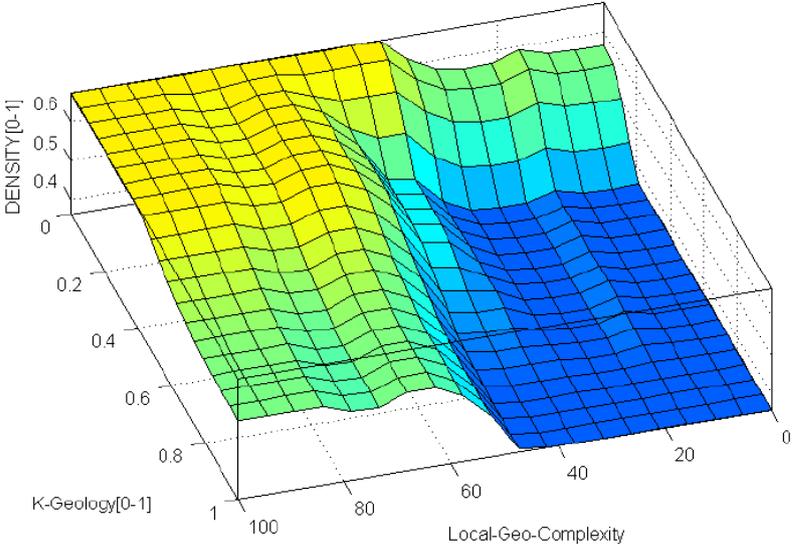


Fig 5.40 Surface / Géologie et Complexité Géologie Locale (Similarité Sites voisins 30%)

Similarity Sites = 50%

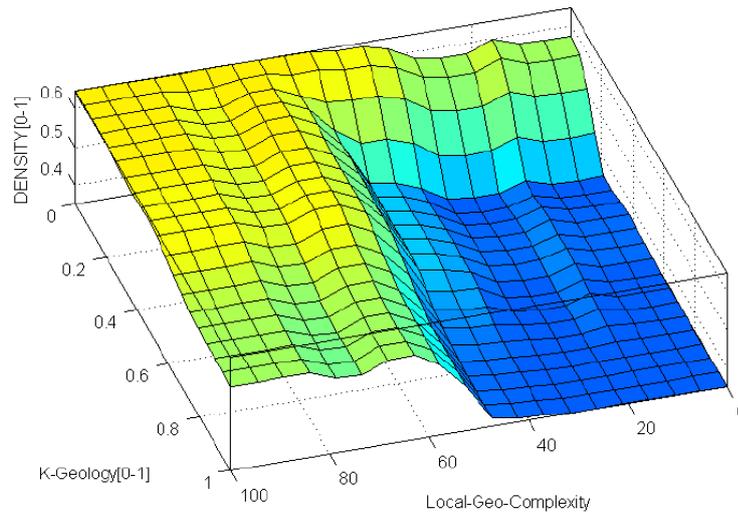


Fig 5.41 Surface / Géologie et Complexité Géologie Locale (Similarité Sites voisins 50%)

Similarity-Sites = 70%

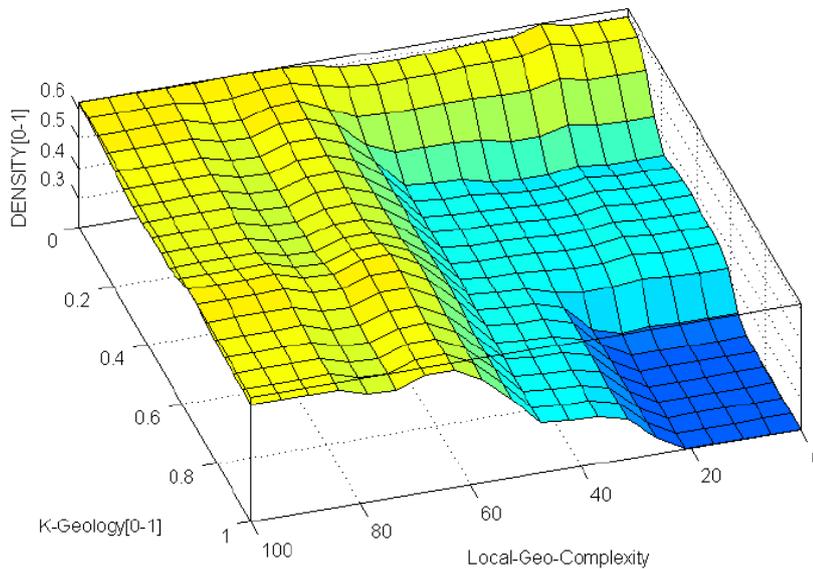


Fig 5.42 Surface / Géologie et Complexité Géologie Locale (Similarité Sites voisins 70%)

Les cas que nous venons de mentionner restent significatifs sur l'évolution de la densité des sondages G lorsqu'on prend en considération 3 paramètres d'entrée pour le système. Les valeurs supérieures de G n'atteignent pas automatiquement la valeur

maximale (limite) 0.81 comme ce fut le cas pour deux ou un seul paramètre d'influence. Elles dépendent évidemment du troisième paramètre fixé.

#### 5.4 PRISE EN COMPTE DE QUATRE PARAMETERS D'ENTREE

Plus de trois paramètres d'entrée ont été considérés dans ce qui suit, et les surfaces de G ont été tracées en fixant deux d'entre eux. La figure 5.43 montre la forme de cette surface quand l'information géologique et les paramètres géotechniques changent. Une courbe spécifique qui se distingue par un pic des valeurs de G autour de 0.78 localisé sur une toute petite portion (Information géologique inexistante et paramètres géotechniques très faibles). Les paramètres fixés sont la similarité à 10% (résultats préliminaires très disparates) et type de projet important (autour de 8).

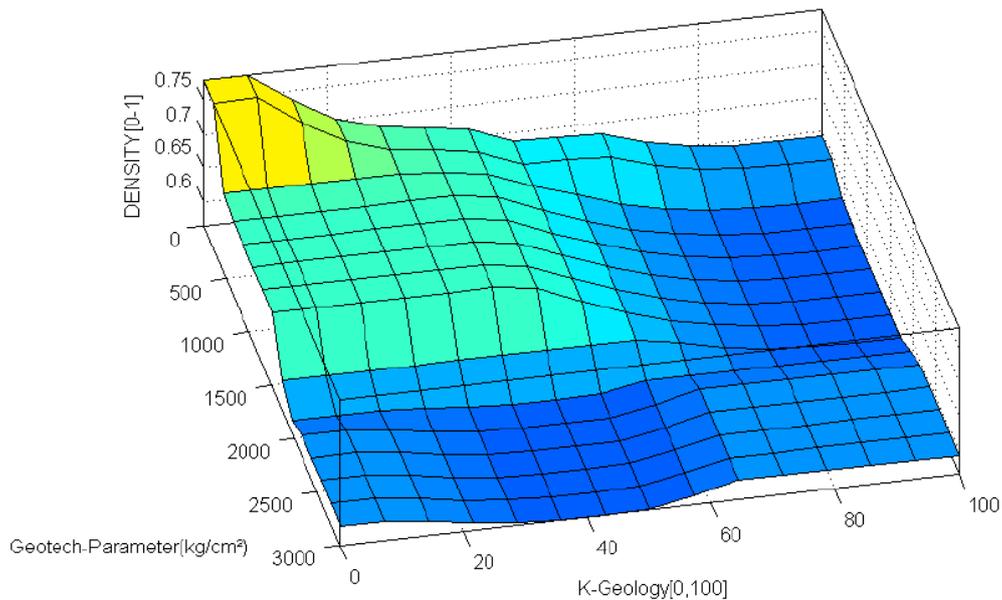


Fig 5.43 Surface / Paramètres géotechniques et Géologie  
Projectype8, Similarity10%

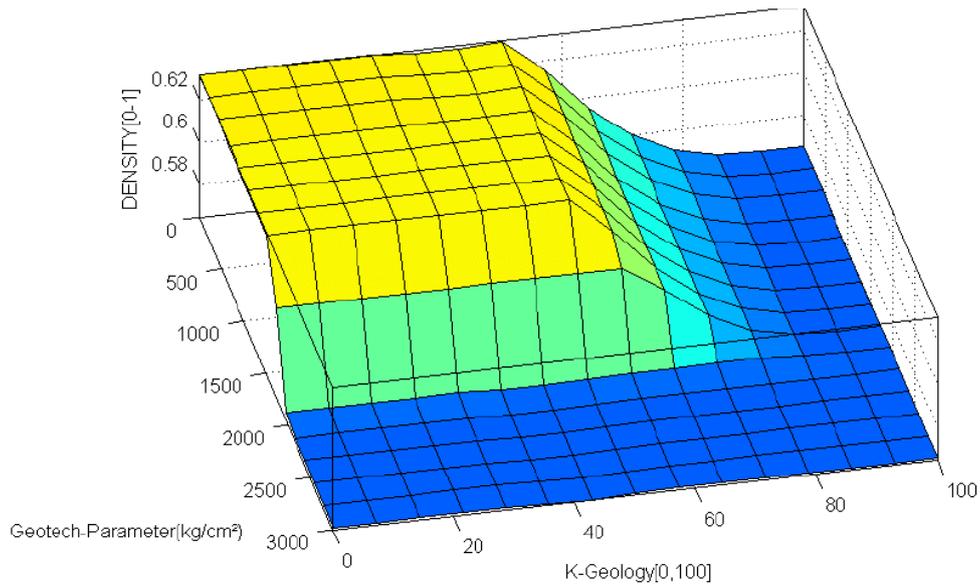


Fig 5.44 Surface / Paramètres géotechniques et Géologie  
Projectype8, Similarity50%

Il suffit de passer à une similarité de 50%, pour le même type de projet (8) pour voir la forme de la surface de G changer et avoir des valeurs nettement inférieures à celles obtenues en fig 5.43. Les valeurs maximales ne dépassent pas 0.65 avec un plateau plus étalé, allant jusqu'à 50% d'information géologique pour des paramètres géotechniques inférieurs à 1500kg/cm<sup>2</sup>. En dehors de ce plateau les valeurs de G tombent jusqu'à 0.56 pour le reste des paramètres. Cette figure illustre bien le changement que l'on peut obtenir en ne faisant varier qu'un paramètre (similarité) comparativement au cas de la figure A.

### 5.5 INFLUENCE DE L'ENSEMBLE DES PARAMETRES D'ENTREE SUR LA DENSITE

La question est de savoir comment évolue la densité lorsque tous les paramètres d'entrée sont pris en compte dans le système d'inférence. Pour pouvoir tracer des surfaces, nous aurons besoin de fixer plus d'un paramètre et ne laisser varier que deux.

Toutes les règles floues seront prises en compte dans ce cas. Basé sur une construction logique en utilisant les ensembles flous traitant d'incertitudes et d'imprécision, le système d'aide à la décision assistera l'ingénieur à avoir une orientation sur le nombre de sondages à exécuter sur site. Les surfaces seront évidemment différentes et varieront d'une manière que l'on ne peut prédire parce que tous les paramètres influencent la

densité (le résultat final), chacun de manière différente. Nous seront intéressés uniquement par la valeur finale de G à utiliser. Cette valeur joue un rôle dans la définition de la décision à prendre, son poids étant une indication sur la densité des sondages à exécuter sur site.

Les figures qui suivent sont citées à titre d'exemple, pour illustrer le comportement de la surface G (décision) en fonction des paramètres pris en compte. La surface prend des valeurs et des formes différentes à chaque combinaison d'entrée. La logique qui sous-tend les règles du système d'inférence est respectée.

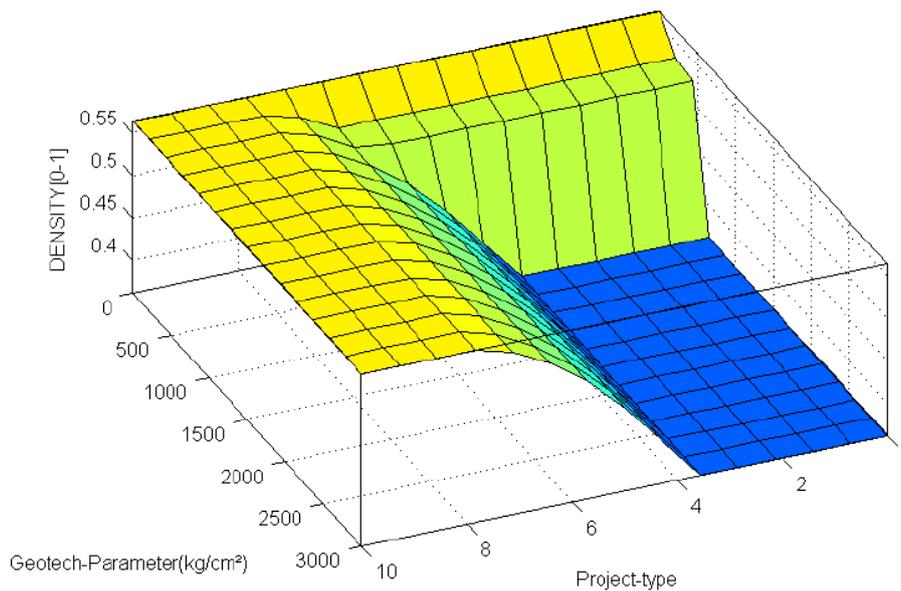


Fig 5.45 Surface / Paramètres géotechniques et Type de projet  
(Complex-géologie10% Géologie 50% Similarité 30%)

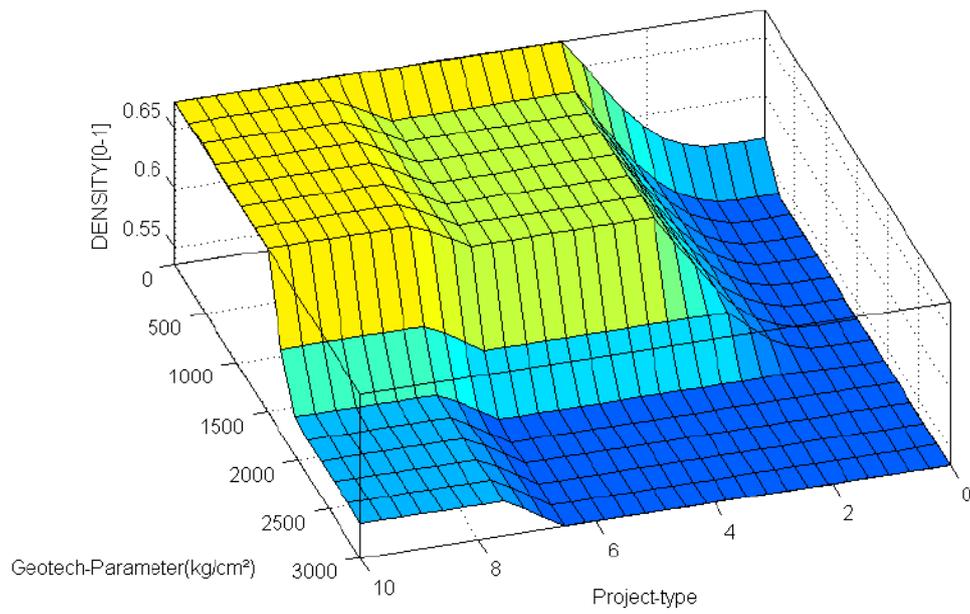


Fig 5.46 Surface / Paramètres géotechniques et Type de projet  
(Complex-Géologie 40% Géologie 10% Similarité 10%)

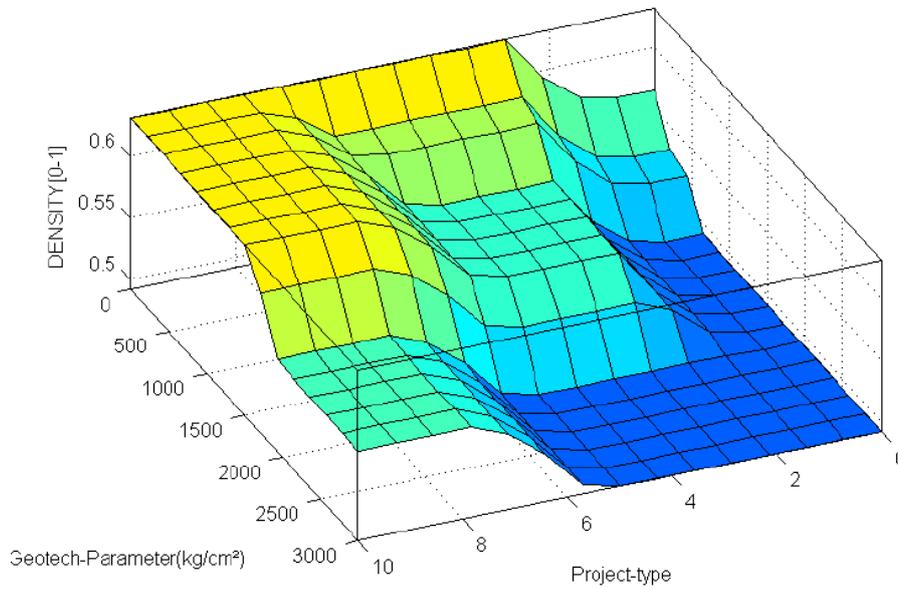


Fig 5.47 Surface / Paramètres géotechniques et Type de projet  
(Complex-géologie 50% Géologie 50% X Similarité 50%)

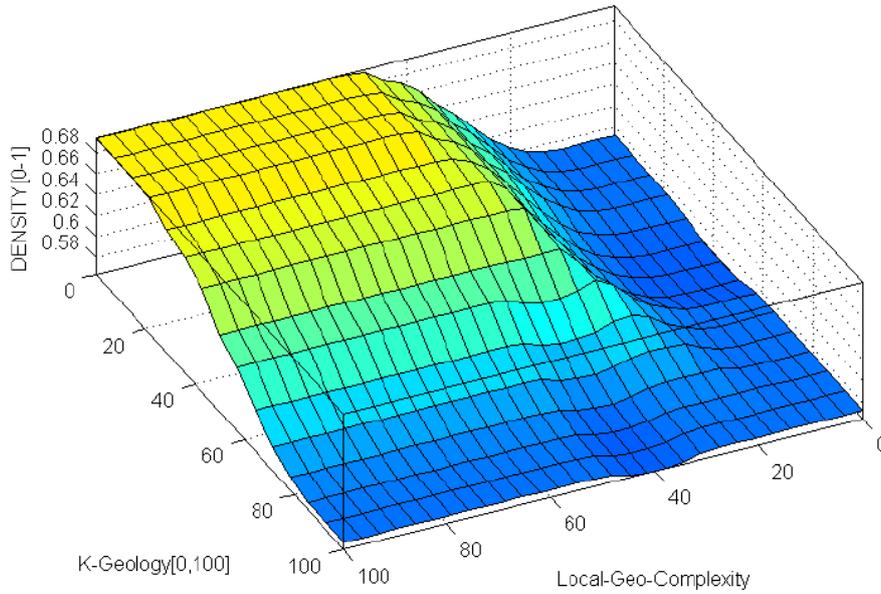


Fig 5.48 Surface / Géologie et Complexité de géologie locale  
 (Paramètre-géotech 100kg/cm<sup>2</sup> Type de projet 5 Similarité 5%)

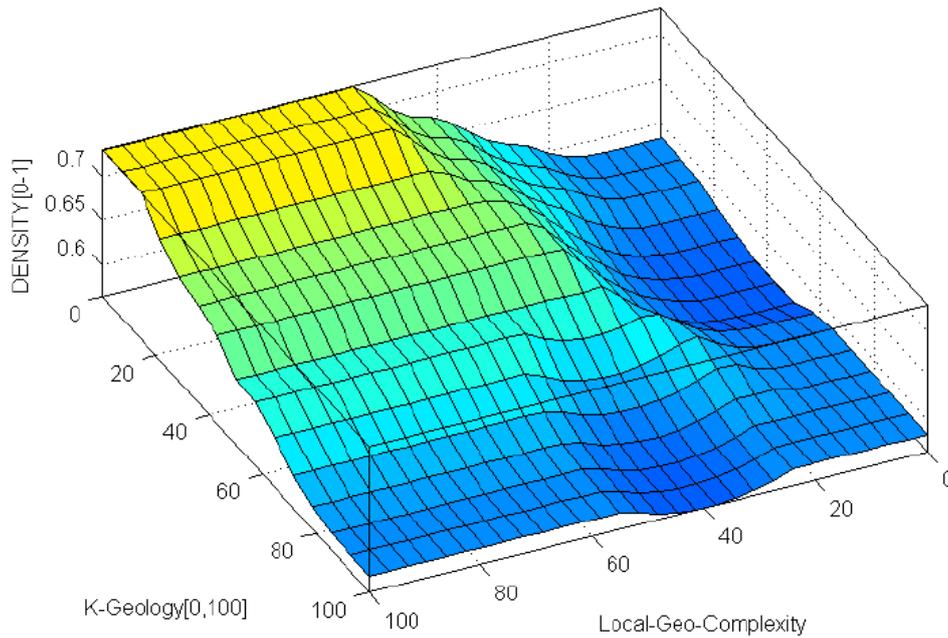


Fig 5.49 Surface / Géologie et Complexité de géologie locale  
 (Paramètre-géotech 100kg/cm<sup>2</sup> Type de projet 8 Similarité 15%)

Ces exemples montrent la variabilité que l'on peut observer dans les surfaces tracées qui sont utilisées comme des outils d'aide à la décision pour l'ingénieur. Les valeurs de G n'ont pas atteint les valeurs minimale et maximale que sont 0.20 et 0.81 comme c'était le cas lorsqu'uniquement deux paramètres indépendants ont été pris en considération.

Dans le cas actuel, tous les paramètres influencent la densité dont les valeurs sont bien inférieures au maximum 0.81 et supérieures à 0.20 la valeur minimal.

Le système d'inférence floue est exécuté avec tous les paramètres pouvant affecter le nombre de sondages sur site. Les paramètres que nous avons exposés ici ne sont pas exclusifs, d'autres peuvent y être associés tels que la présence de la nappe phréatique...etc. Chacun des paramètres, comme nous l'avons exposé, influencera avec un certain degré la décision et le résultat final sera exprimé sous forme de poids après défuzzification des résultats partiels. Ce résultat final représente une densité des sondages à compléter sur site, pour une caractérisation adéquate basé notamment sur le jugement de l'ingénieur.

## **CONCLUSION**

Nous avons exposé l'influence des paramètres d'entrée, sur la densité des sondages à exécuter pour une investigation géotechnique, lorsqu'ils sont pris indépendamment, chacun avec les règles floues qui lui sont associées. Pour ce faire nous avons tracé les courbes de la « densité » ne dépendant que d'un seul paramètre choisi. Il a été montré que les variations de G sont continues, régulières et obéissent à la logique des règles floues adoptées pour chaque paramètres. Les variations de ces courbes sont lisses et dénotent un raisonnement efficace pour traiter de la densité des sondages sur site. Lorsque la géologie est « inconnue » par exemple ceci impliquera de grandes valeurs de la densité G, qui atteignent le maximum 0.81, le minimum des valeurs étant 0.20.

Lorsque deux paramètres sont utilisés pour représenter la surface de G, les variations sont aussi régulières et suivent la logique des règles floues implémentées. Les valeurs sont confinées entre 0.20 et 0.81, avec différentes formes pour les surfaces. Dans tous les exemples traités avec deux paramètres, ces valeurs limites ont été atteintes. Ce qui signifie que les degrés d'influence des paramètres en question sont pleinement pris en compte et l'indépendance des paramètres a une influence sur la densité.

Cependant lorsqu'on trace des courbes (surfaces) pour trois paramètres d'entrée --deux étant libres et un troisième pris constant, les valeurs des surfaces sont confinées dans des intervalles plus petits que [0.2, 0.81]. Les surfaces présentent différentes formes dépendant de la valeur constante du troisième paramètre. Les trois paramètres sont

dépendant les uns les autres et la densité  $G$  des sondages est très sensible à leurs valeurs. Ce qui a été montré dans nombre d'exemple traités.

La prise en compte de quatre paramètres d'entrée indique également que les valeurs et la forme des surfaces obtenues changent d'une situation à l'autre, selon les paramètres fixes choisis.

Quand on prend en considération tous les paramètres d'entrée, donc toutes les règles floues enclenchées, nous aurons besoin de fixer constants ceux qui ne sont pas sur les axes de la courbes  $(X,Y)$ . Les limites des valeurs de  $G$  obtenues dans ce cas sont différentes de  $[0.20, 0.81]$  pour toutes les situations, parce que les paramètres sont connectés entre eux, chacun a son influence. Les formes des surfaces sont très différentes lorsqu'on passe d'une valeur fixe de paramètre à une autre. Et elles changent d'une situation à l'autre, en fonction des valeurs des paramètres.

L'utilisation de courbes et de surfaces pour représenter la densité des sondages est utile et aide l'ingénieur dans l'analyse des facteurs et leur importance pour la caractérisation géotechnique de site. Pour un site donné, le SIF implémente toute l'information disponible sur les paramètres d'entrée, le résultat est donné sous forme de poids  $G$  qui permet à l'ingénieur de juger de la densité de sondages adéquate à performer.

# **CHAPITRE 6**

# 6

## UTILISATION DES PROBABILITES COMME OUTIL D'AIDE DANS LE SYSTEME D'INFERENCE FLOU

### INTRODUCTION

Cette section est consacrée à l'utilisation des probabilités comme outil d'aide dans un système d'inférence flou. L'idée étant de chercher les distributions de probabilité de l'ensemble de sortie du SIF lorsqu'on utilise des distributions uniformes à l'entrée. Pour ce faire la méthode de Monte Carlo est utilisée à travers des simulations d'un nombre de points pris aléatoirement de chaque paramètre d'entrée et évaluer pour ces points les résultats du système d'inférence en utilisant des histogrammes de distribution. Les points simulés aléatoirement par la méthode Monte Carlo suivent une distribution uniforme de probabilité.

Nous avons observé que les ensembles flous sont utiles lorsqu'il s'agit d'analyser des situations où les incertitudes et l'imprécision sont présentes. Le Système d'Inférence Flou construit pour estimer la densité des sondages pour les investigations géotechniques est pratique et efficace, il traduit bien le raisonnement humain

En vue de simuler toutes les possibilités de résultats possibles on utilise des points générés aléatoirement à partir des ensembles d'entrée, et on exécute le système pour chacun des points ainsi créés. L'avantage de cette simulation c'est qu'elle permet de visualiser les résultats sous forme d'histogrammes ou de distributions de probabilité.

Le même raisonnement est utilisé lorsqu'on prend des intervalles de valeurs de paramètres d'entrée. Dans un site donné par exemple la géologie est classée en termes linguistiques « Connue », « Relativement connue »...etc. La perception de l'ingénieur

suggère plutôt d'utiliser des intervalles de valeurs que des valeurs ponctuelles du degré d'information géologique (variant entre 1 et 100%), même si celles-ci sont considérées avec un degré d'appartenance dans l'ensemble flou en question. Soit à prendre en considération une géologie jugée «Connue» d'un site. Il est plus facile pour l'ingénieur d'attribuer un intervalle de valeurs pour «Connue» qu'une seule valeur du degré d'information géologique. Avec une distribution uniforme de probabilité sur les intervalles d'entrée et en utilisant le SIF on obtient une distribution de probabilité aussi en sortie.

Dans la section précédente nous avons vu l'importance de visualiser les résultats du SIF sous forme de courbes et de surfaces. Cependant on ne peut pas tracer toutes les courbes ou surfaces possibles de résultats. En vue de simuler toutes les possibilités de résultats on utilise des points générés aléatoirement à partir des ensembles d'entrée, et on exécute le système d'inférence pour chacun des points ainsi créés. L'avantage de cette simulation c'est qu'elle permet de visualiser les résultats sous forme d'histogrammes ou de distributions de probabilité.

## **6.1 ANALYSE DES RESULTATS**

Soit à utiliser trois paramètres d'entrée pour l'analyse, «Géologie-Information», «Complexité de la géologie locale» et «Similarité» des résultats préliminaires. La densité  $G$  du SIF serait un résultat particulier correspondant à une situation connue dans l'ensemble flou d'entrée «géologie», à une condition donnée de «complexité de la géologie», et à une valeur de la «similarité» indiquant la variabilité des résultats préliminaires.

Essayons de balayer un nombre de combinaisons des paramètres d'entrée. Pour chaque combinaison un résultat  $G$  est obtenu. Si toutes les entrées possibles sont prises en considération nous devrions obtenir une distribution de poids  $G$  qui pourrait être analysée statistiquement.

Comme il n'est pas possible de combiner toutes les valeurs faisables des ensembles d'entrée, nous utiliserons des simulations Monte Carlo pour générer un certain nombre de points de chaque paramètre d'entrée. La distribution uniforme est alors utilisée dans ce cas. Les points aléatoirement créés de chaque ensemble d'entrée suivent une distribution uniforme de probabilité et ils représentent ainsi l'ensemble des valeurs du

vecteur d'entrée. Comme le système d'inférence flou est exécuté en utilisant des distributions de probabilité à l'entrée nous obtiendrons, également, des distributions de probabilité à la sortie.

Le but de cette approche est d'analyser les résultats du Système d'Inférence et d'anticiper leur tendance en termes de distribution de probabilité. En deuxième lieu nous utiliserons le même raisonnement en l'appliquant à des intervalles des ensembles d'entrée du système.

## **6.2 ENSEMBLES FLOUS D'ENTREE COMME VECTEURS**

Chaque paramètre d'entrée est remplacé par un vecteur composé de nombres aléatoires, générés en utilisant des distributions uniformes de probabilité. Des simulations Monte Carlo sont utilisées à cet effet. L'ensemble «Géologie» variant entre [0,100%] est remplacé par un vecteur  $r(k)$  généré aléatoirement avec des éléments distribués uniformément en termes de probabilité. Le même raisonnement est utilisé pour « la complexité » de la géologie locale du site et la similarité (ou variabilité) des résultats préliminaires, leurs valeurs sont simulées par des vecteurs  $q(j)$  et  $t(m)$  générés aléatoirement. Le support de l'ensemble flou «type de projet» est pris comme un vecteur  $s(l)$  variant entre [1,10] généré aléatoirement aussi. Lorsque l'information est disponible sur les paramètres géotechniques du sol [ $1,3000\text{kg/cm}^2$ ] nous utilisons un vecteur  $p(i)$  dont les éléments sont compris entre [1,3000]. Le nombre d'éléments pour chaque vecteur est pris en fonction des simulations Monte Carlo. Un minimum  $N=1000$  points est pris.

Une fois que sont connues les distributions uniformes de probabilité pour chaque vecteur d'entrée nous chercherons les distributions des résultats (sortie) obtenus par le système d'inférence flou. Nous cherchons par ce biais à connaître le comportement en sortie des résultats et leur tendance générale lorsque toutes les possibilités ont été prises en compte dans les ensembles d'entrée.

Les paramètres d'entrée pris en compte pour le système d'inférence flou sont:

- Paramètres géotechniques ( $\text{kg/cm}^2$ ) [1,3000],  $p(i)$
- Complexité de la géologie locale [0,100],  $q(j)$
- Géologie – Connue (degré d'information) [0,100],  $r(k)$

- Type de projet [1,10], s(l)
- Similarité des résultats préliminaires (Variabilité du sol) [0,100], t(m)

Le système d'inférence flou est exécuté comme suit :

Un nombre N de réalisations aléatoires de chaque paramètre d'entrée est calculé en utilisant la méthode Monte Carlo. Les vecteurs  $p(i=1,N)$ ,  $q(j=1,N)$ ,  $r(k=1,N)$ ,  $s(l=1,N)$  et  $t(m=1,N)$  sont pris en compte et le système d'inférence appliqué pour chacun des points. Les résultats obtenus sont exprimés en termes d'histogrammes et de densités de probabilité.

Un exemple de paramètre d'entrée « paramètres géotechniques »  $p(i=1,N)$  est donné dans la figure 6.1 qui suit, il s'agit du vecteur constitué de nombres aléatoires avec distribution uniforme de probabilité.

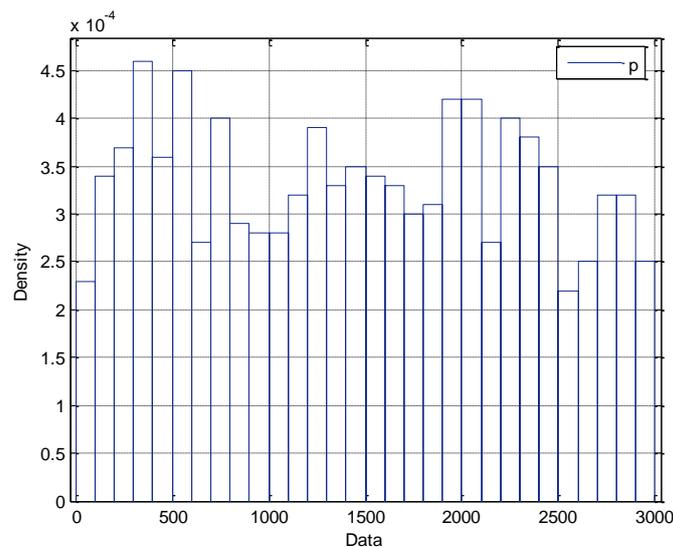


Figure 6.1 Paramètre d'Input p, N=1000  
(Généré par une distribution uniforme de probabilité)

L'histogramme de la figure 6.2 montre la distribution des résultats en sortie pour N=1000. La valeur moyenne est  $M=0.5437$ , les valeurs minimale et maximale de G sont  $Min=0.2015$  et  $Max=0.8091$ . L'écart-type  $Std=0.07586$  et la gamme (range)  $R=0.6076$ .

Notons que les résultats sont concentrés autour de la valeur moyenne M.

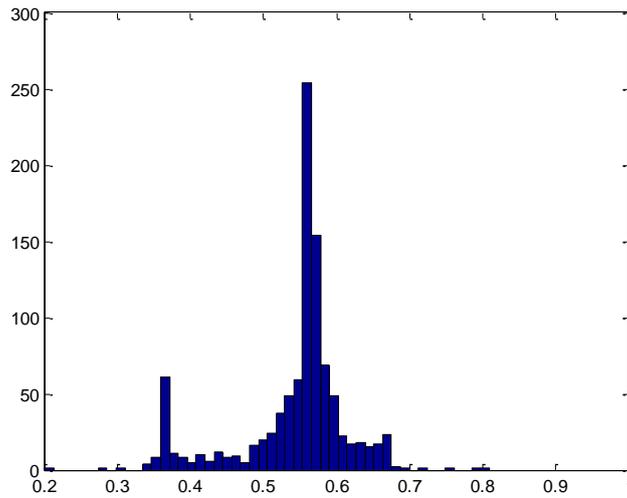


Figure 6.2 Histogramme des résultats G

En utilisant une fonction d'approximation (de fitting) "non paramétrique" des résultats, nous obtenons une distribution telle qu'illustrée en figure 6.3.

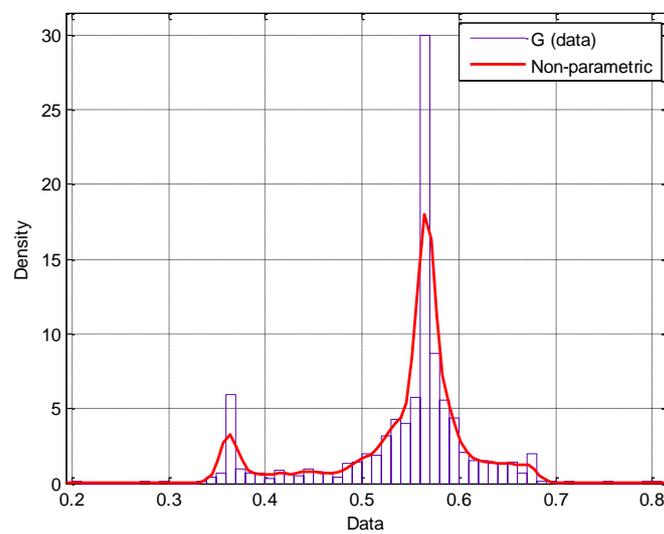


Figure 6.3 Densité de G, approximée (fitted) par une distribution Non-paramétrique

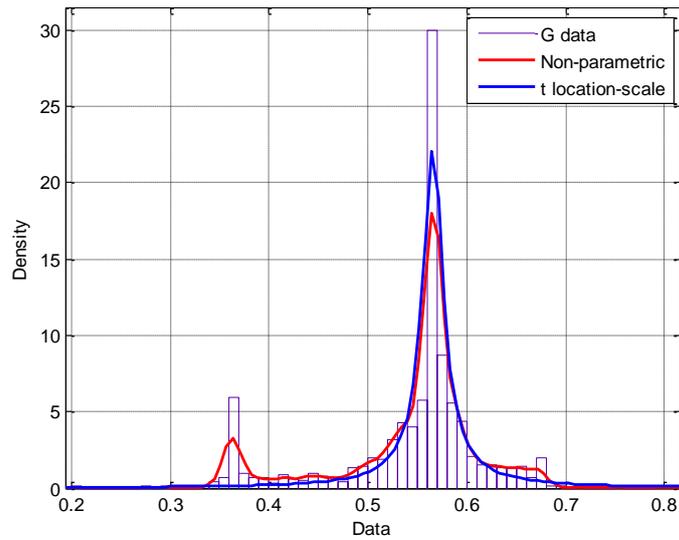


Figure 6.4 Approximation des résultats G par une fonction de probabilité “t location-scale” (Comparaison avec une fonction “Non-paramétrique”)

En figure 6.4 nous observons la distribution statistique des résultats, une approximation par fonction « non paramétrique » ainsi qu’une comparaison avec une fonction de distribution de type « Student t-location scale ». Les paramètres d’estimation et les erreurs standards de la fonction « t-location scale » sont donnés dans les tableaux qui suivent :

Parameter	Estimate	Standard Error
Mu	0.565815	0.000533449
Sigma	0.0134959	0.00137892
Nu	0.751885	0.05612

Et la covariance des paramètres estimés :

	Mu	Sigma	Nu
Mu	2.84568e-007	-4.46793e-008	-1.64176e-006
Sigma	-4.46793e-008	1.90141e-006	6.20697e-005
Nu	-1.64176e-006	6.20697e-005	0.00314946

Les résultats  $G$  sous forme de fonctions de densité de probabilité approximées sont illustrée en figures 6.3 et 6.4. Ces figures montrent une grande part de ressemblance. La courbe de la distribution « Student t location scale » est pratiquement identique à celle de la fonction « non-paramétrique ». Les résultats ont la même forme et la fonction « t location-scale » semble correspondre aux résultats de sortie.

Les fonctions cumulatives de distribution (FCD) « Non paramétrique » et « T location scale » sont approximées aux résultats obtenus par le SIF et sont illustrées en figure 6.5. Nous remarquons que les courbes des deux fonctions cumulatives sont très proches pour des valeurs de  $G$  variant de 0.55 à 0.6 et diffèrent pour d'autres points. Les formes des courbes restent comparables malgré ces différences. Notons également la variation importante dans les FCD lorsque  $G$  varie entre 0.5 et 0.6.

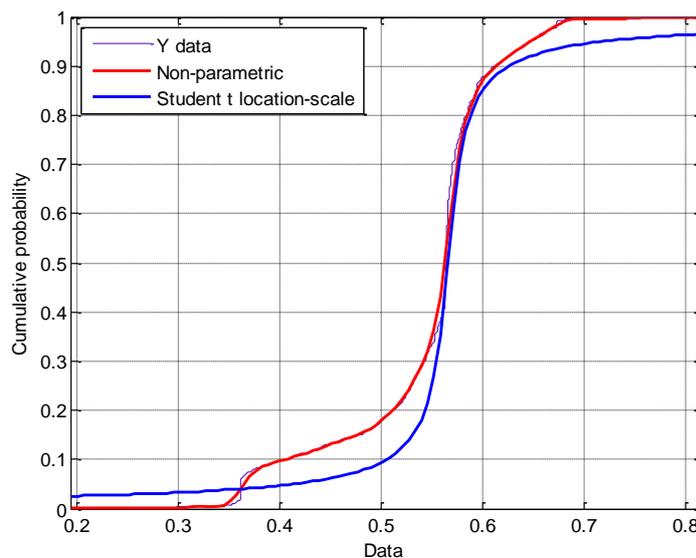


Figure 6.5 Fonction de Distribution Cumulative (FDC)  
Résultats approximatés avec des fonctions “Non-paramétrique”  
et “t location-scale”.

Et le tracé de probabilité des résultats comparés à des fonctions “non paramétrique” et de “ Student t location-scale” est donné dans la figure 6.6 qui suit, où nous pouvons noter les différences et les similitudes.

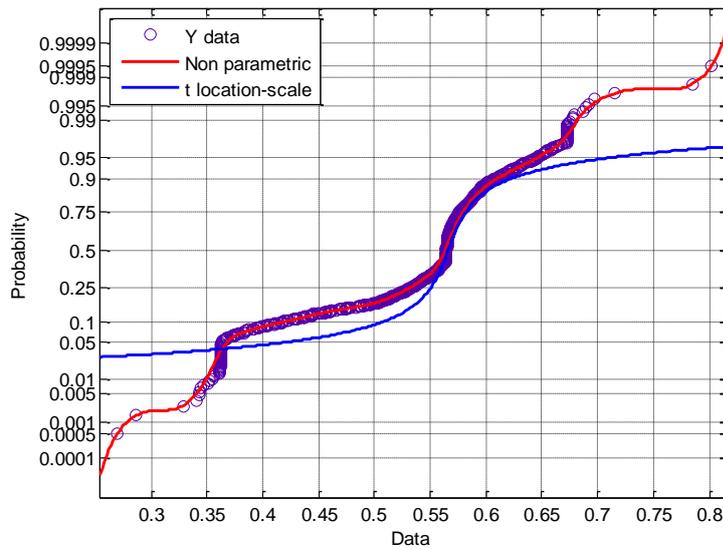


Figure 6.6 Tracé des probabilités des résultats, comparées aux fonctions d'approximation (Non-paramétrique et t location-scale)

Les distributions de probabilité des résultats  $G$  qui ont été obtenues indiquent qu'une tendance des résultats est concentrée autour de la moyenne  $M$  avec un écart-type relativement faible. La figure 6.5 montre la probabilité cumulée des résultats qui varie rapidement de 0.2 à 0.9 lorsque  $G$  se trouve dans l'intervalle  $[0.5, 0.6]$ . Ceci dénote qu'il est plus probable d'obtenir une grande part de résultats du SIF dans cette rangée de valeurs de  $G$ .

### 6.3 ANALYSE PAR INTERVALLES (PLAGES) D'ENTREE

Lorsque des intervalles de valeurs d'entrée sont pris en considération il y a plus de possibilités qui sont couvertes que si des valeurs uniques de chaque ensemble flou de l'input sont utilisées. Nous utiliserons le même raisonnement que précédemment. On génère des valeurs de l'input pour chaque intervalle qui nous intéresse en utilisant la méthode Monte Carlo. Les points de chaque intervalle d'entrée sont pris aléatoirement avec une distribution uniforme de probabilité. Les longueurs des intervalles sont estimées en se basant sur le jugement de l'ingénieur et l'information disponible.

L'intérêt d'utiliser des intervalles est qu'ils permettent de couvrir les points autour d'une valeur principale, et ils permettent aussi de prendre en considérations les incertitudes. Même si l'utilisation de valeurs uniques d'entrée avec des degrés d'appartenance sur les ensembles flous permet en elle-même de traiter avec le manque

d'information, il serait très intéressant de prendre en considération des intervalles autour des valeurs d'entrée en questions. Le prise en compte de ces intervalles se fait en générant un certain nombre de points aléatoires ayant une distribution de probabilité uniforme et exécuter le SIF pour chacun de ces points afin de voir la distribution des résultats à la sortie.

Dépendant des intervalles pris en compte, la moyenne et l'écart-type de l'output et sa distribution de probabilité sont des éléments utiles pour estimer la décision à prendre sur le nombre de sondages à exécuter sur site.

L'analyse des résultats obtenus à partir d'intervalles permet de prédire mieux la décision lorsque l'information est connue sous forme d'intervalles pour chacun des paramètres d'entrée. Effectivement il est plus facile pour l'ingénieur d'affecter des intervalles de valeurs pour les paramètres que de leur donner des valeurs uniques chacun, même si ces valeurs sont des éléments d'ensembles flous.

#### **6.4 ETUDE DE CAS**

Un exemple est analysé en utilisant des intervalles de valeurs autour de chaque entrée d'ensemble flou.

- La moyenne « Complexité géologique » est prise avec un intervalle entre [30-50%]
- L'intervalle sur la « géologie » (degré d'information) est [20-40%]
- Le « type de projet » est pris avec des valeurs situées entre [3-5]
- La « similarité » (variabilité) des résultats préliminaires est prise dans l'intervalle [30-50%]

Pour la « Complexité géologique » les points aléatoires générés sont pris sous forme de vecteur  $q(j)$  dans l'intervalle [30;50%]. De l'ensemble flou «Géologie » nous avons pris un vecteur  $r(k)$  avec des valeurs variant entre [20, 40%]. Le « type de projet » a pour valeurs dans l'intervalle [3,5] en utilisant le vecteur  $s(l)$ . Et la « similarité » (variabilité) des résultats préliminaires est représentée par un vecteur  $t(m)$  allant de [30-50%]. Avec  $j, k, l$  et  $m = 1, N$  et  $N$  étant le nombre de points pris en considération dans la simulation Monte Carlo. Le nombre de réalisation  $N$  que nous avons adopté pour nos calculs est  $N=1000$ .

Les résultats obtenus sont présentés en figure 6.7, avec une moyenne  $M=0.5043$ , un écart-type  $Std=0.0516$ , une valeur minimale de  $G$ ,  $Min=0.4045$  et un maximum  $Max=0.6093$ , La gamme des valeurs étant  $R = 0.2048$ .

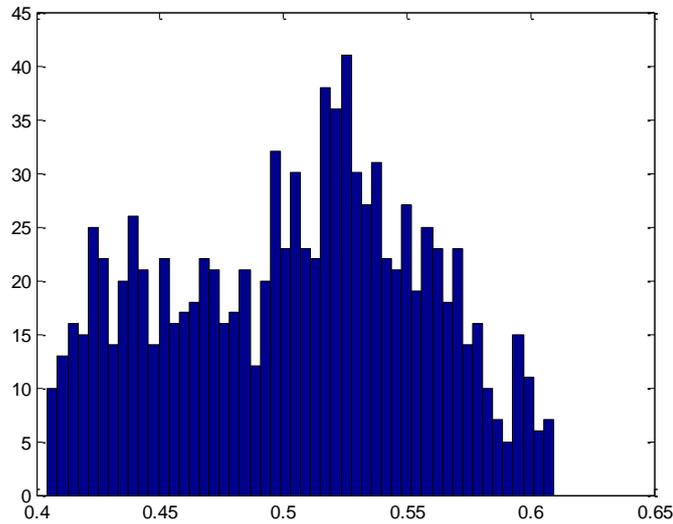


Figure 6.7 Histogramme des résultats

Ces résultats sont approximés avec une fonction “non- paramétrique” telle que présentée en figure 6.8.

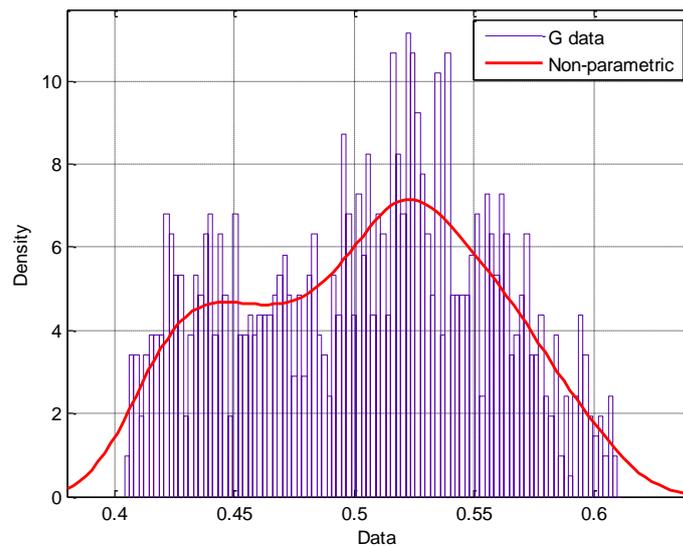


Figure 6.8 Fonction de probabilité Non-paramétrique approximée avec les résultat (G)

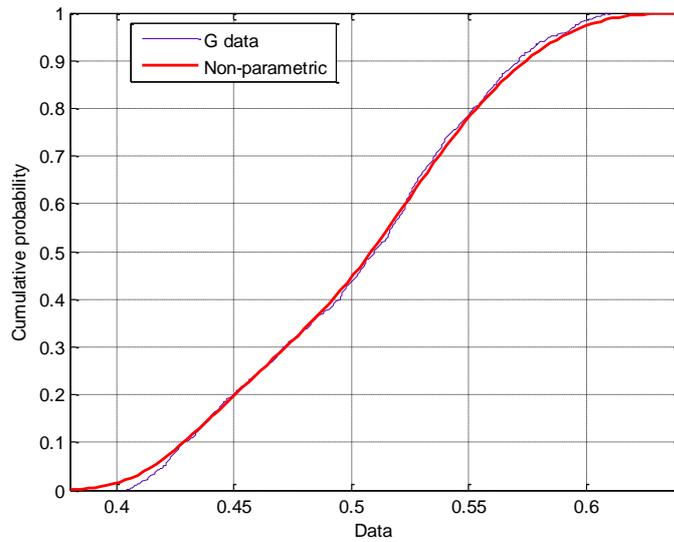


Figure 6.9 Distribution Cumulative «Non-paramétrique » approximée avec la distribution des résultats

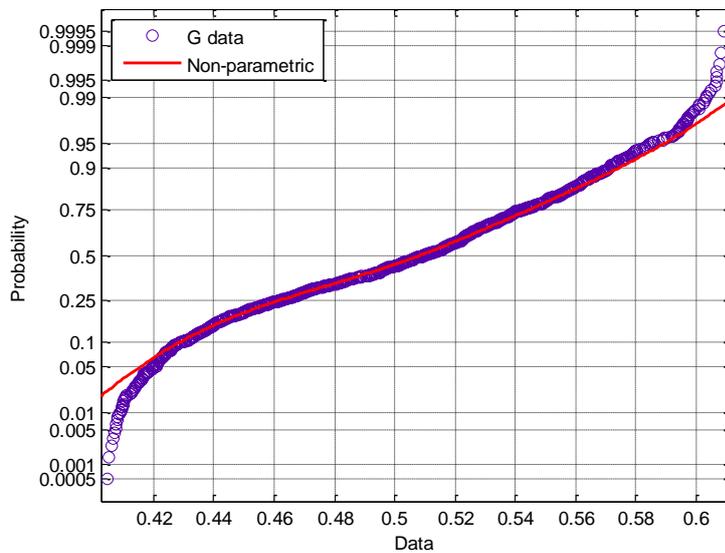


Figure 6.10 Tracé de la probabilité des résultats comparée à une probabilité «Non-paramétrique»

D'autres simulations ont été effectuées avec des intervalles plus étroits centrés sur chaque valeur de paramètre d'entrée tels que donnés en exemple 5.1 et les résultats montrent des tendances comme le montrent les figures qui suivent. Les intervalles d'entrée pris en considération sont :

- « complexité de la géologie »  $q(j) = [38 ; 43]$

- « information sur la géologie »  $r(k) = [28 ; 33]$
- « type de projet »  $s(l) = [3 ; 5]$
- « Similarité des résultats préliminaires »  $t(m)=[38 ; 43]$

Les simulations Monte Carlo ont été appliquées en utilisant un nombre de points tirés  $N=1000$  réalisations pour chaque paramètre d'entrée. Les résultats du Système d'Inférence Flou sont donnés ci-dessous ;

La moyenne  $M=0.5041$ , le minimum  $Min=0.4372$ , le maximum  $Max=0.5781$ , la gamme =  $0.1408$  et l'écart-type  $Std=0.03472$ .

Notons que la valeur moyenne est pratiquement la même que dans l'application précédente quand on utilise des intervalles plus larges à l'entrée. Mais la valeur de l'écart-type est plus petite ce qui explique que les résultats sont plus serrés. Les résultats obtenus de l'utilisation d'intervalles plus courts ne sont pas très différents de ceux obtenus en usant d'intervalles larges autour des valeurs principales des paramètres.

La figure 6.11 montre l'histogramme des résultats, et en figure 6.12 ils sont présentés avec une fonction d'approximation « Non-paramétrique »

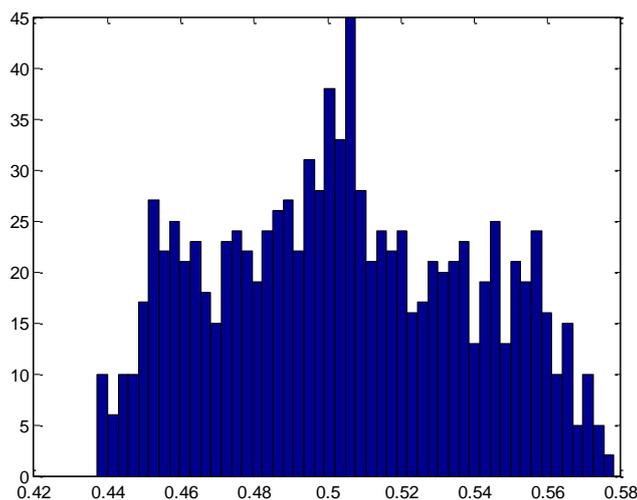


Figure 6.11 Histogramme des résultats

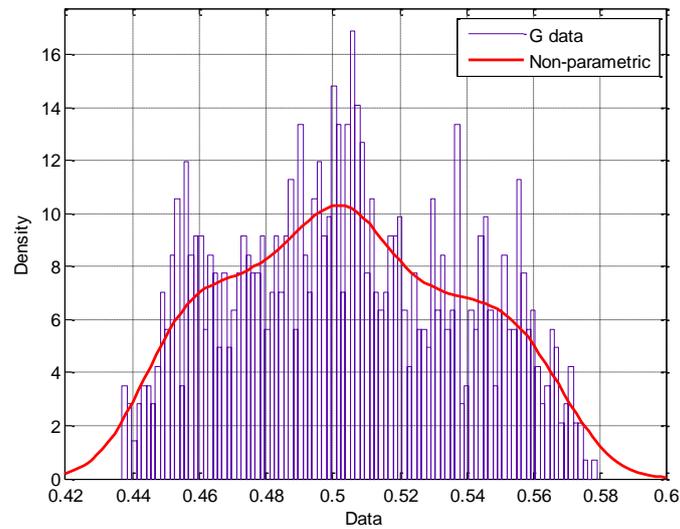


Figure 6.12 Approximation des résultats avec une fonction Non-paramétrique

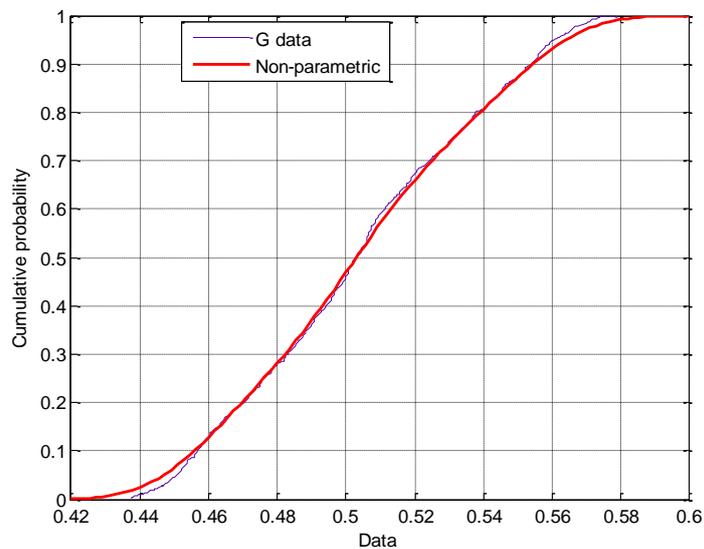


Figure 6.13 Fonction de Distribution Cumulative des résultats approximée avec une fonction Non-paramétrique

L'analyse par intervalles est un support intéressant sur la précision des résultats du système d'inférence flou. Les ensembles flous sont bien adaptés au manque d'information, cependant lorsque l'ingénieur n'est pas sûr des valeurs de paramètre à prendre il serait plus fiable d'utiliser des intervalles autour de ces valeurs.

Au lieu de prendre des valeurs uniques (singulières) de paramètres d'entrée nous utilisons donc des intervalles pour mieux appréhender les incertitudes. Parce que l'information est qualitative en général, cette approche aide à mieux comprendre et interpréter les résultats et ainsi prendre des décisions sur le nombre de sondages requis sur site.

Dans les expressions (1) et (2) on peut utiliser les valeurs moyennes des résultats  $G$  pour déterminer la densité des sondages requis sur site. Dans cet exemple le nombre de sondages est alors calculé en utilisant la valeur moyenne  $M=0.504$ . En remplaçant dans (3) nous obtenons :

$$N_{opt}=(G*N_{min})/\bar{G}_{min} = 0.504 \times 34 / 0.3638 = 47,1. \text{ Nous choisissons 48 sondages.}$$

Dans le premier essai de l'exemple 5.1 quand nous avons calculé sans intervalles nous avons obtenu le nombre de 47 sondages comme estimation optimale.

## **6.5 LES RESULTATS DEPENDENT DES INTERVALLES D'ENTREE**

Deux exemples ont été traités pour montrer les différences entre résultats à la sortie. Deux types d'intervalles d'entrée ont été implémentés à cet effet. Les résultats sont illustrés dans la figure qui suit. La densité de probabilité de chaque histogramme est comparée à des fonctions d'approximation non paramétriques.

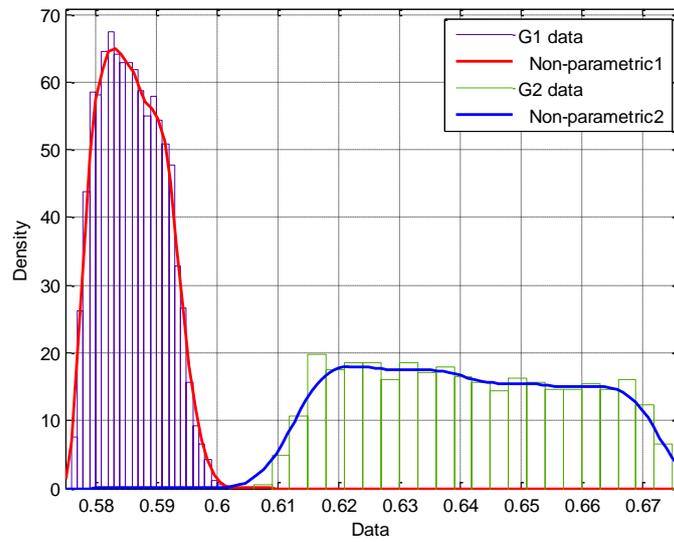
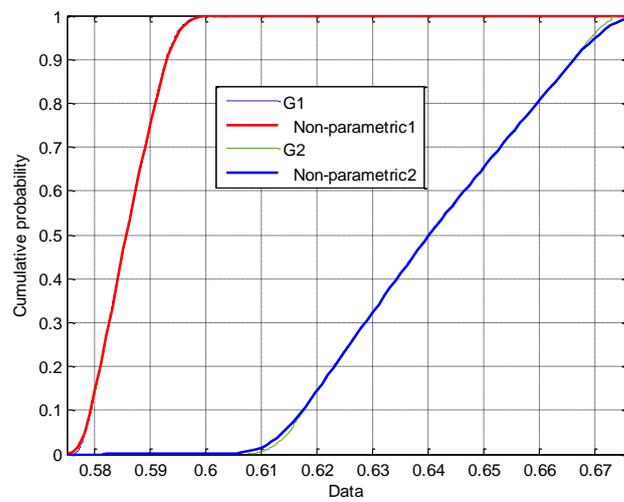


Figure 6.14 Densités G1 et G2 approximées par des fonctions « Non-paramétriques »



Figures 6.15 Fonctions de Distribution Cumulatives pour deux cas d'intervalles d'entrée

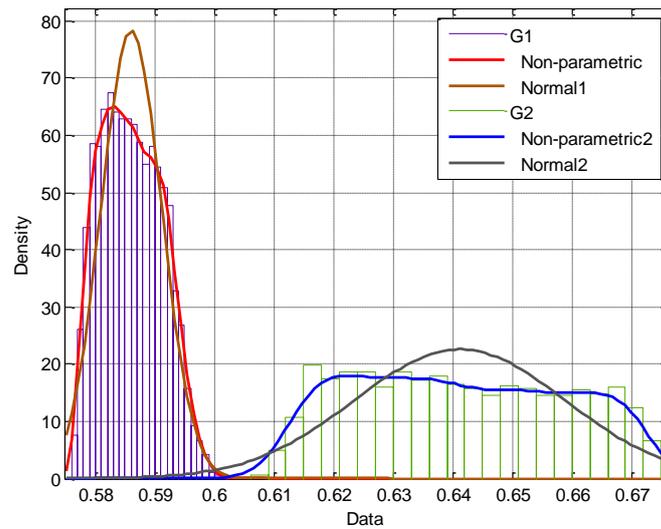


Figure 6.16 Fonctions de densité de probabilité G1et G2  
 Comparaison avec des distributions normales

Nous observons dans ces deux cas traités, qu’avec des intervalles d’entrées différents les résultats à la sortie sont également différents, et leurs fonctions de probabilité (distribution) sont distinctes, avec des valeurs moyennes qui ne sont pas dans la même tendance. Ceci illustre le fait que même si une analyse globale des résultats a donné, comme on l’a vu auparavant, une distribution de type « Student t-scale », des intervalles d’entrée localisés induisent eux des résultats différents qui n’obéissent pas à une loi de probabilité particulière. Leurs distributions sont totalement différentes dans la forme et dans les valeurs moyennes. Comme nous le remarquons sur la figure, la première combinaison d’intervalles d’entrée conclut à des résultats dont la densité de probabilité est étroitement centrée sur la valeur moyenne G1 avec une approximation presque de type « Normale », tandis que la deuxième combinaison d’intervalles d’entrée mène à une distribution plus large et pratiquement de type « uniforme » des résultats.

## CONCLUSION

Une approche basée sur les ensembles flous est proposée pour estimer le nombre optimal de sondages sur site pour des investigations géotechniques. A cause de leurs possibilités à traiter des incertitudes et du manque d’information, les ensembles flous sont adéquats pour décrire les paramètres influençant la densité des sondages à exécuter sur site. Parmi ces paramètres on peut citer ; la géologie, la variabilité du sol, et le type de projet à construire.

Les investigations géotechniques sont généralement conduites en deux étapes, l'une préliminaire permettant d'avoir une information grossière sur le sol et une seconde étape plus détaillée basée sur les résultats de la première et sur l'information géologique et géotechnique disponible sur le site. Le Système d'Inférence Flou proposé permet de prendre en considération l'influence de chaque paramètre sur la densité des forages à exécuter. Un exemple a été traité et sert de calibration pour déterminer le nombre optimal de sondages pour de futures sites de projets.

Les résultats du SIF sont analysés en usant de la méthode Monte Carlo par la simulation de nombres de réalisations des paramètres d'entrée. Les nombres aléatoires sont générés avec des distributions uniformes de probabilité pour chaque paramètre d'entrée. Les résultats obtenus sont exprimés sous forme d'histogrammes et de distributions de probabilité. Nous avons noté que les résultats de l'output, lorsque tous les points des paramètres d'entrée sont pris en considération, ont une distribution de probabilité qui est très bien approximée par une fonction de type « t-location scale ». Les résultats sont concentrés autour d'une valeur moyenne avec une certaine dispersion relativement faible (écart-type).

Pour un site donné, au lieu d'utiliser des valeurs uniques pour chaque paramètre d'entrée nous avons utilisé des intervalles qui permettent de balayer plus de possibilités et de prendre en considération les incertitudes humaines. Des points aléatoires ont été générés dans chaque intervalle en utilisant la méthode Monte Carlo, avec des distributions uniformes de probabilité. Les longueurs des intervalles dépendent du jugement de l'ingénieur et de l'information disponible sur le paramètre en question.

L'intérêt d'utiliser des intervalles de valeurs pour l'input est de permettre la prise en considération des incertitudes humaines, ça aide également à considérer le manque d'information et procéder à une analyse plus pertinente des résultats du SIF. Effectivement pour allouer des valeurs aux paramètres d'entrée il serait plus facile à l'ingénieur d'utiliser des intervalles de valeurs que des valeurs uniques, même si dans ce cas les ensembles flous utilisent la notion de fonction d'appartenance. Dépendant des intervalles pris en compte, la moyenne et la dispersion (écart-type) des résultats ainsi que leur distribution en termes de probabilité permettent d'estimer le nombre optimal de sondages à effectuer sur site.

# **CHAPITRE 7**

# 7

## UTILISATION DES ENSEMBLES ALEATOIRES POUR L'ESTIMATION DE LA DENSITE DE SONDAGES EN INVESTIGATION GEOTECHNIQUE

### INTRODUCTION

Une approche à base d'ensembles aléatoires, pour l'estimation de la densité de sondages, est présentée dans la section qui suit. Le concept d'ensemble aléatoire est intimement lié au concept de probabilité supérieure et probabilité inférieure (Upper and Lower Probabilities ; Dempster-Shafer 1976), qui exprime la notion de degré de croyance et de degré de plausibilité d'un évènement. La notion de probabilité subjective a été énoncée par en premier par De Finetti (1930). Elle sera utilisée dans notre cas comme le degré de croyance qu'un expert (géotechnicien) pourrait émettre pour estimer le nombre de sondages sur un site, étant donnée une certaine information préliminaire.

Lorsque plus d'un expert devront s'exprimer sur un site, la construction de boîte de probabilité (probabilité Sup. et Inf, Enveloppe de probabilités) devient un outil adéquat. Le résultat sera exprimé sous forme d'enveloppe de probabilités concernant la densité de sondages requis pour une investigation géotechnique. Le jugement de l'ingénieur s'apparente correctement à ce type de probabilité. Les incertitudes, notamment épistémiques, sont prises en considération.

L'information existante sur un site est généralement donnée sous forme de cartes géologiques et topographiques ainsi que d'éventuels résultats de sites voisins. Le jugement de l'ingénieur est important quant à la manière de conduire une investigation géotechnique et spécialement en ce qui concerne la densité des sondages ou des points de reconnaissance à y effectuer. L'ingénieur aura un degré de croyance sur la densité des sondages qui dépend de cette information préliminaire (variabilité des paramètres de sol, géologie et type de projet...). Plus importante cette information préliminaire et plus

important sera le degré de croyance de l'expert sur le nombre de sondages à exécuter. Le degré de croyance peut s'exprimer sous forme de probabilité subjective par les experts. En fonction donc, de l'information disponible l'ingénieur aura à formuler un poids (degré) de croyance sur un nombre de sondages à effectuer en se basant aussi sur les recommandations des règlements et code de pratique (Eurocode7...).

Dans les chapitres précédents nous avons mis l'accent sur l'utilisation des ensembles flous. Dans cette partie nous introduirons les concepts d'ensemble aléatoire et de probabilités supérieure et inférieure (upper and lower probabilities).

## 7.1 INCERTITUDES ET ENSEMBLES ALEATOIRES

Helton (1997) (in Alvarez, 2008) a classé les incertitudes en deux groupes distincts, aléatoire et épistémique. L'incertitude épistémique est reliée à la variabilité naturelle des paramètres. L'incertitude épistémique est reliée au manque d'information ou de données, cependant elle peut être réduite au fur et à mesure que de nouvelles données deviennent accessibles. L'analyse par intervalles, ou par la théorie des possibilités ainsi que la théorie des ensembles aléatoires (Random Sets) ont montré des aptitudes appropriées à traiter ce genre d'incertitude subjective. Dans notre cas l'information peut être exprimée par le biais d'intervalles ou des termes linguistiques (Alvarez, 2008).

### 7.1.1 Ensembles aléatoires

Un ensemble aléatoire fait quelques fois référence à une structure de type Dempster-Shafer et il est donné par des sous-ensembles finis  $A_i$  appelés des ensembles focaux (focal sets) d'un ensemble donné  $X$ , chacun ayant un poids de probabilité  $m(A_i)$  avec  $\sum m(A_i) = 1$ , comme indiqué sur la figure 7.1 (Oberguggenberger, 2005).

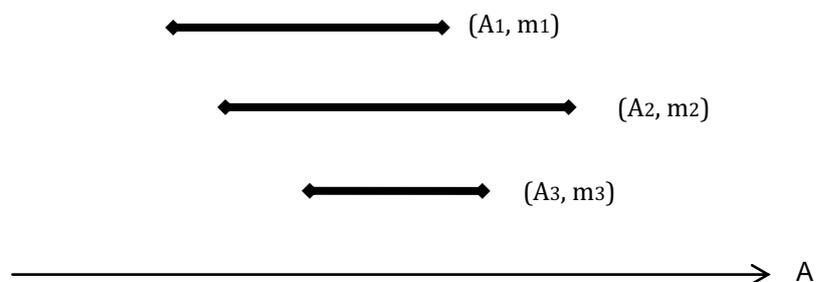


Fig. 7.1 Ensemble aléatoire (Random set) A

Dans l'approche de Demspster-Shafer l'ensemble aléatoire permet de définir un degré de croyance  $\gamma(S)$  et un degré de plausibilité  $\eta(S)$  de manière à ce que les réalisations du paramètre A soient comprises dans S par ;

$$\gamma(S) = \sum_{A_i \subset S} m(A_i)$$

$$\eta(S) = \sum_{A_i \cap S \neq \emptyset} m(A_i)$$

La fonction de croyance  $\gamma(S)$  or *Bel* est un sous ensemble S obtenu par la sommation des éléments (attributs) de probabilité des  $A_i$  inclus dans S. La fonction de plausibilité  $\eta(S)$ , or *Pl* est obtenue de la sommation des attributs de probabilité de la fonction de  $A_i$  qui ont une intersection non nulle avec S. Ce sont des enveloppes de toutes les fonctions cumulatives possibles compatibles avec les données.

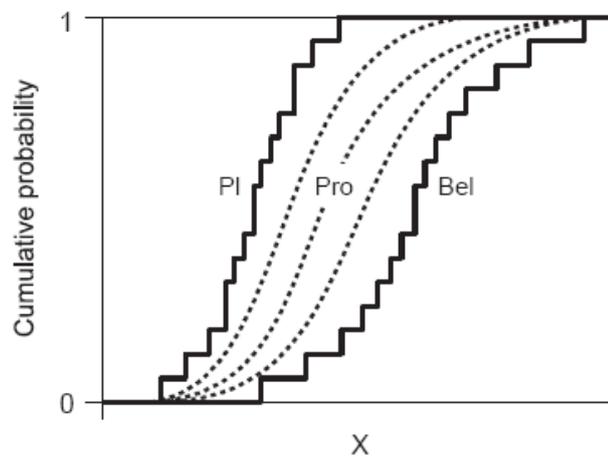


Fig. 7.2 Enveloppe Supérieure (PI) et Enveloppe inférieure (Bel) avec (Pro) comme probabilité précise.

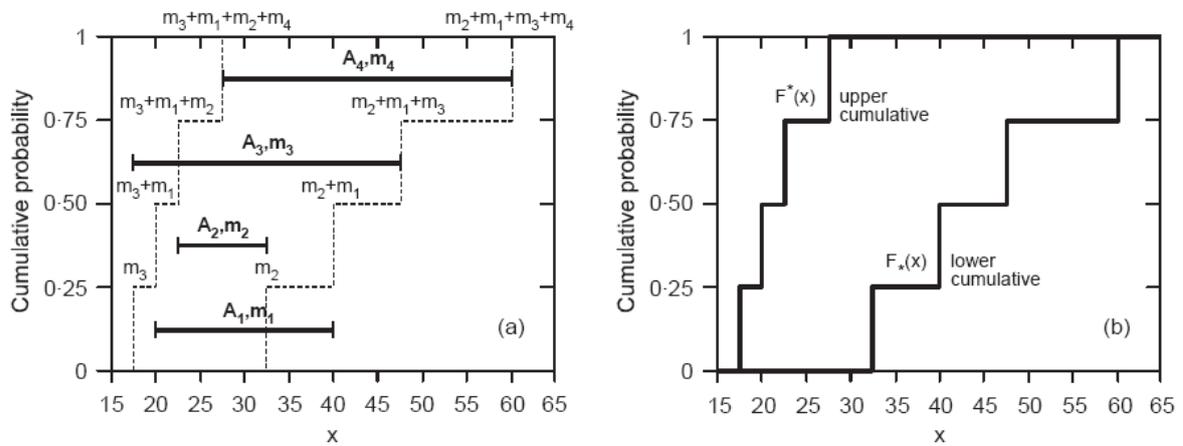


Fig. 7.2 Ensemble aléatoire :

(a) construction, (b) fonction de distribution cumulative-supérieure et inférieure <sup>1</sup>.

Considérons par exemple une structure de Dempster-Shafer formée par l'assemblage d'informations fournies par quatre sources différentes (livres, experts, analyse préliminaire...) sur l'angle de frottement de quelque sol. Chaque opinion formera un élément  $A_i$  de l'ensemble focal  $A$ . On suppose que  $A = \{A_1 = [20^\circ, 22^\circ], A_2 = [21^\circ, 23^\circ], A_3 = [18^\circ, 20^\circ], A_4 = [20^\circ, 25^\circ]\}$ . L'attribut de base pour chacun de ces éléments représentera l'importance de chaque opinion dans notre évaluation.

Supposons par exemple que  $(m(A_1)=0.4, m(A_2)=0.2, m(A_3)=0.1, m(A_4)=0.3)$ ; cela veut dire que nous donnons à la première source d'information le plus de confiance (de crédit) (Alvarez, 2008).

## 7.2 PROBABILITES IMPRECISES

Elles décrivent un concept plus large incluant le concept de probabilité selon Dempster-Shafer. C'est un outil pratique pour traiter des incertitudes lorsque l'information est manquante ou faible.

Dans les projets d'ingénierie il est souvent question pour les ingénieurs d'avoir quelque savoir personnel ou subjectif basé sur leur expérience passée. Les probabilités imprécises permettent de traiter de ce genre de d'information (savoir), elles représentent le savoir sous sa forme qualitative. Lorsque la probabilité représente un

savoir individuel, subjectif sur quelque état de la nature, elle est aussi dite « degré de croyance » (Wuben, 1993).

Il y a trois fonctions importantes dans la théorie de Dempster-Shafer sur les probabilités;

La probabilité de base ( $m$ ), la fonction de croyance ( $Bel$ ), et la fonction de plausibilité ( $Pl$ ). La probabilité de base ( $m$ ) ne renvoie pas à la conception classique de probabilité. La valeur  $m$  d'un ensemble  $A$ ,  $m(A)$  exprime la proportion de tout l'ensemble des preuves supportant le fait qu'un élément particulier de  $X$  appartienne à l'ensemble  $A$  (Klir, 1998).

### **7.3 SITUATION DU PROBLEME**

L'idée d'utiliser les ensembles aléatoires pour estimer la densité de sondages est soutenue par leur habileté à prendre en considération l'information vague et incertaine. Le degré de croyance d'un ingénieur sur un paramètre est basé sur l'information disponible et sur son propre parcours (expérience). Dans notre cas, ce sera la construction de probabilité supérieure et inférieure pour estimer le nombre de sondages pour investigation géotechnique. Le calibrage se fera par rapport aux recommandations de l'Eurocode7 sur les investigations géotechniques.

Considérons les opinions d'ingénieurs concernant la densité des sondages en se basant sur une information préliminaire (variabilité du sol, géologie, type de projet...). Chaque ingénieur peut donner un intervalle de valeurs basées sur son « degré de croyance ». Son jugement sera supporté par l'information disponible telle la variabilité de sol obtenue des sondages préliminaires, ou des détails sur la géologie locale ainsi que d'éventuels éléments des sites voisins.

Nous définissons  $X$  comme un ensemble aléatoire,  $A$  étant l'intervalle du nombre de sondages.

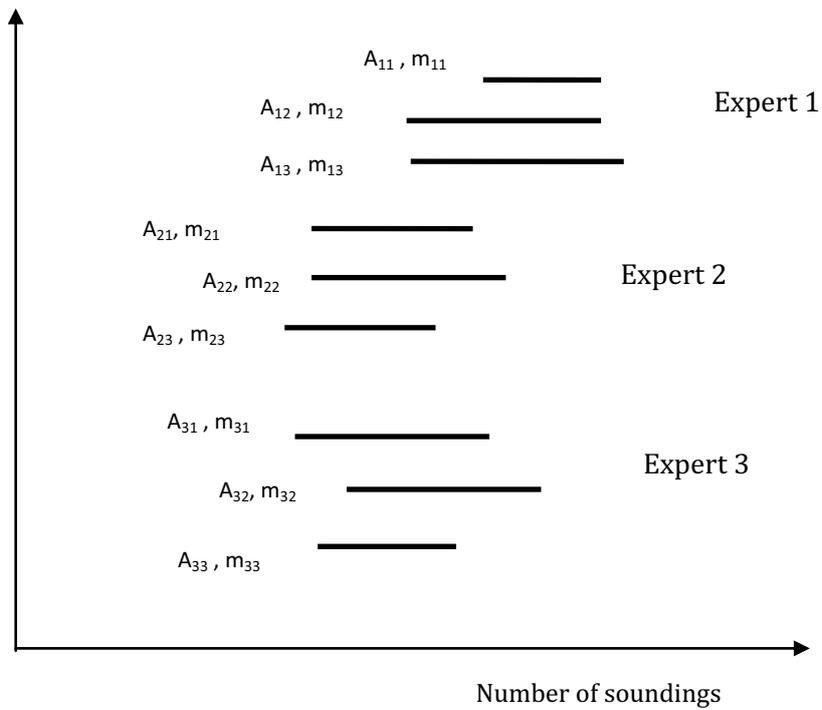


Fig 7.3 Random set (Density of soundings)

L'ensemble aléatoire est construit comme suit,

Pour un nombre d'experts  $E$ , chacun proposant  $N_j$  intervalles  $(A_{ji})$  avec  $m_{ji}$  poids de la probabilité pour chaque intervalle,  $i=1, N_j$

$$\sum_{i=1}^{N_j} m_{ji} = 1$$

L'ensemble aléatoire à construire en prenant en considération l'ensemble des experts est noté

$$\{(A_{ij}, \hat{m}_{ij}) : i = 1, \dots, N_j ; j = 1, \dots, E\}$$

$$\hat{m}_{ji} = \frac{1}{E} \cdot m_{ji}$$

$$q_j = \frac{1}{E}$$

Le degré de confiance en chacun des experts est distribué uniformément. Ils sont tous crus de manière égale.

Si on affecte un degré de confiance  $q_i$  à chacun des experts, différemment,  $q_1, \dots, q_E$  avec  $\sum_{k=1}^E q_k = 1$

Dans ce cas on calcule un degré de croyance moyen comme suit;

$$\hat{m}_{ji} = q_j \cdot m_{ji}$$

$$\sum_{j=1}^E \sum_{i=1}^{N_j} \hat{m}_{ji} = 1$$

La boîte de probabilité (supérieure et inférieure) sera ainsi construite en se basant sur ces ensembles aléatoires, et utilisée comme outil d'aide à l'a décision.

Dans le schéma que nous proposons le jugement de l'expert se base sur l'information préliminaire d'un paramètre qui affecte l'investigation géotechnique (variabilité du sol par exemple). Lorsque plusieurs paramètres interviennent, les ensembles aléatoires seront formulés par agrégation de l'information.

Le système proposé est d'abord exécuté en utilisant un seul paramètre (variabilité du sol), le résultat sera donné sous forme de boîte de probabilités. En second lieu deux paramètres d'influence seront pris en considération (variabilité du sol et géologie). Les ensembles aléatoires sont additionnés pour obtenir un système unique permettant par la suite de construire les boîtes de probabilités.

#### **7.4 UTILISATION DU PARAMETRE VARIABILITE DU SOL**

Comment quantifier (classifier) la variabilité du sol par les experts? Une échelle de 1 à 10 est proposée, représentant des intervalles de « très faible », « faible », « moyenne » et « importante » variabilité de sol.

L'Eurocode7 propose 1 sondage tous les 40m comme minimum pour une investigation. Le degré 1 de variabilité du sol correspondant à « très faible » nécessite un nombre minimal de sondages tel que recommandé par l'Eurcode7. Le nombre maximal de

sondages selon les codes de pratique et certains auteurs (Hunt 2007) est donné par 1 sondage / surface de  $15 \times 15 \text{m}^2$ . Globalement le nombre de sondages par unité de surface  $40 \times 40 \text{m}^2$  varie entre 1 comme minimum et 6 comme maximum, mais nous pouvons avoir besoin de plus de points de reconnaissance si l'information sur le site n'est pas suffisante.

Considérons les opinions d'experts sur la densité de sondages sur site, étant donnée la variabilité du sol. Pour un certain degré de variabilité de sol entre 1 et 10 l'expert donnera un nombre correspondant de sondages avec un certain degré de croyance (poids de probabilité  $m_{ij}$ )

La figure suivante donne un aperçu lorsque plusieurs experts interviennent, avec des degrés de croyance différents.

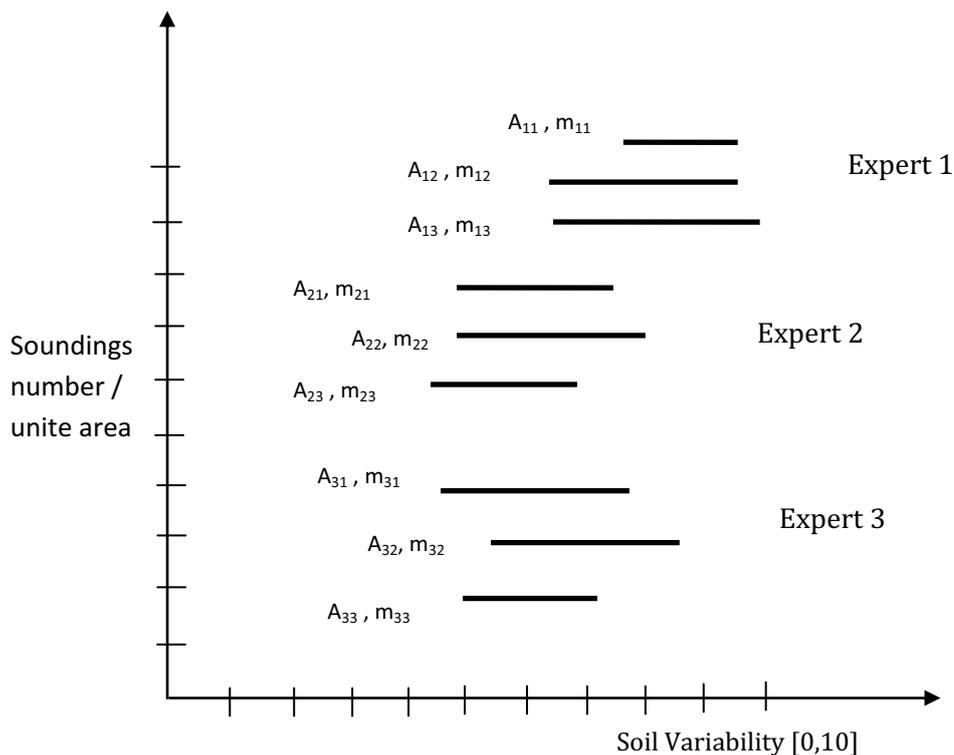


Fig 7.4 L'ensemble aléatoire nombre de sondages selon la variabilité du sol – plusieurs experts interviennent

## 7.5 CONSTRUCTION DE LA FONCTION OBJECTIVE

### 7.5.1 Approche point par point

Le premier essai se fera avec un seul expert. Selon l'Eurocode7 le nombre minimum de sondages est de 1 pour une surface de 40x40m<sup>2</sup>. Ce nombre minimum tel qu'expliqué auparavant pourrait être utilisé pour une variabilité de sol « très faible » comprise dans l'intervalle [0,2], afin de calibrer le système. Si le nombre maximal de sondages (6 à 8 par unité de surface 40x40m<sup>2</sup>) correspond à une variabilité « importante » 10 sur l'échelle, nous pourrions supposer une fonction à variation linéaire reliant le « nombre de sondages » à la « variabilité du sol ». Cette fonction permettra de construire la boîte des probabilités supérieure et inférieure (Upper and Lower probability) comme outil d'aide à la décision.

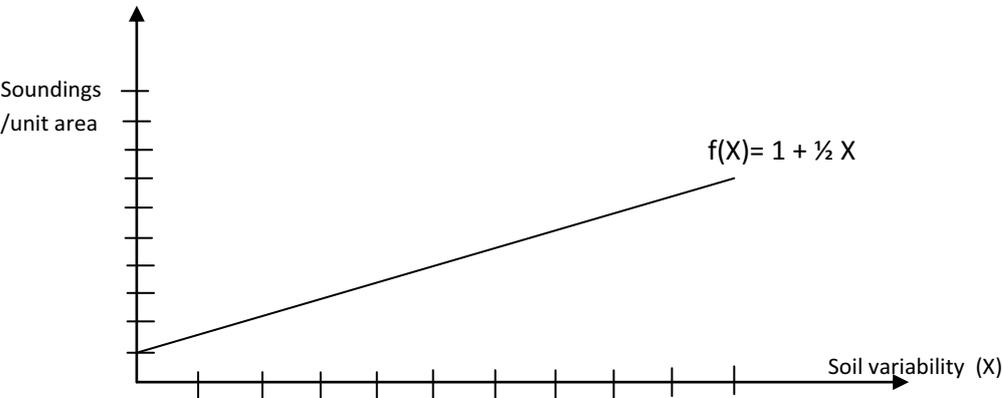


Fig 7.5 La fonction objective f(X), linéaire.

La fonction objective que nous avons obtenue est donnée par  $f(X) = 1 + (1/2)X$ , elle permet de calculer le nombre de sondages en se basant sur un degré de variabilité du sol.

Exemple;

L'expert 1 a proposé un nombre de sondages en se basant sur une variabilité de sol "faible" mais cette variabilité est donnée sous forme d'intervalles. Chaque nombre de sondages est donné avec un degré de croyance  $m_i$ .

Variabilité du sol = [0,3]	$n_1=2$	$m_1= 1/4$
Variabilité du sol = [1,5]	$n_2=3$	$m_2= 1/4$
Variabilité du sol = [2,4]	$n_3=3$	$m_3= 1/2$

En utilisant la fonction objective  $f(x)$  que nous venons de construire nous obtiendrons le nombre de sondages par unité de surface, avec degré de croyance (Tableau).

Nombre de sondages	Degré de croyance
[1, 2.5]	$m_1=1/4$
[1.5, 3.5]	$m_2=1/4$
[2, 3]	$m_3=1/2$

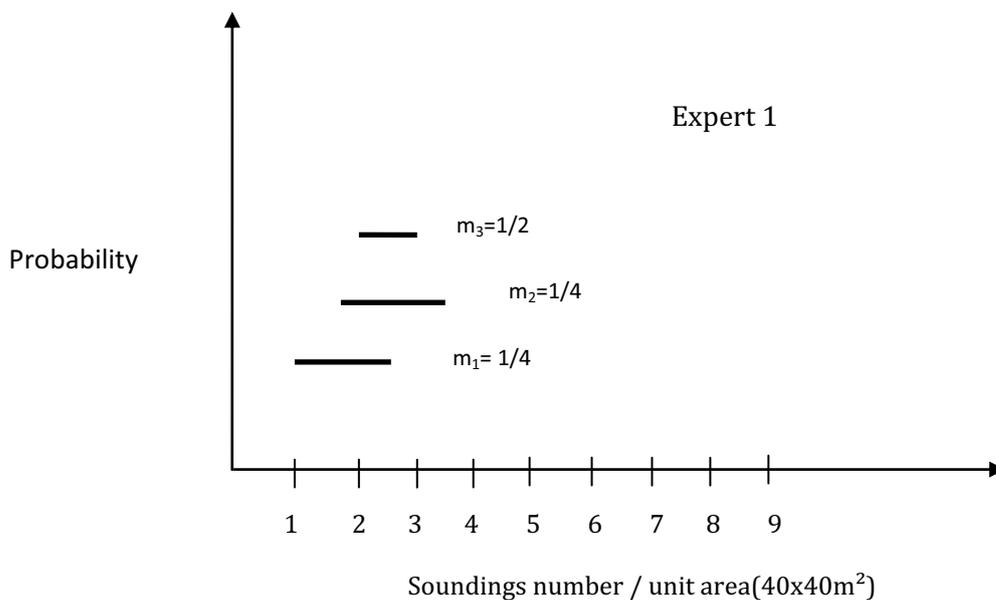


Fig 7.6 Construction de l'ensemble aléatoire « nombre de sondages » en utilisant  $f(X)= 1+ \frac{1}{2} X$ , en se basant sur l'expert 1

La prochaine étape consiste en la construction des boîtes de probabilités supérieures et inférieures (upper and lower probabilities). Cette construction permet de cerner le nombre de sondages sur site selon un expert donné.

La figure qui suit montre le schéma de principe pour la construction des probabilités inférieure (Bel) et supérieure (PI)

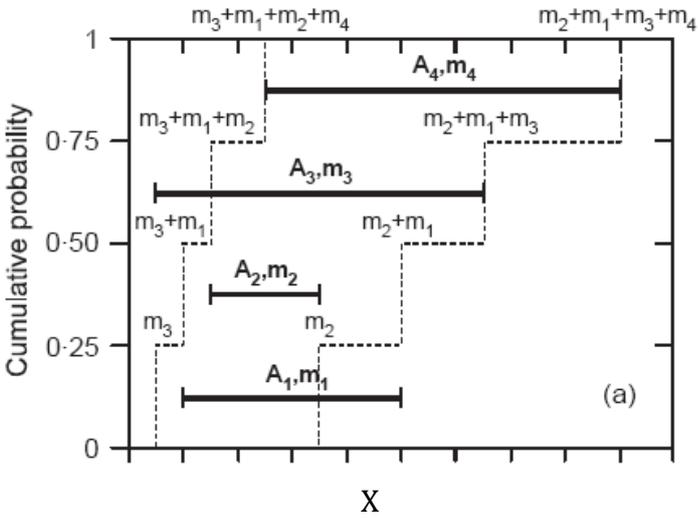


Fig 7.7 Schéma de construction des probabilités supérieure(PI) et inférieure à partir d'un ensemble aléatoire (A,m)

$$F_*(x) = \sum_{i:x \geq u_i} m(A_i)$$

$$F^*(x) = \sum_{i:x \geq l_i} m(A_i)$$

L'ensemble aléatoire de la figure 7.6 ainsi construit permet de déduire les probabilités supérieure et inférieure (Upper and lower probabilities), telles qu'indiquées sur la figure suivante.

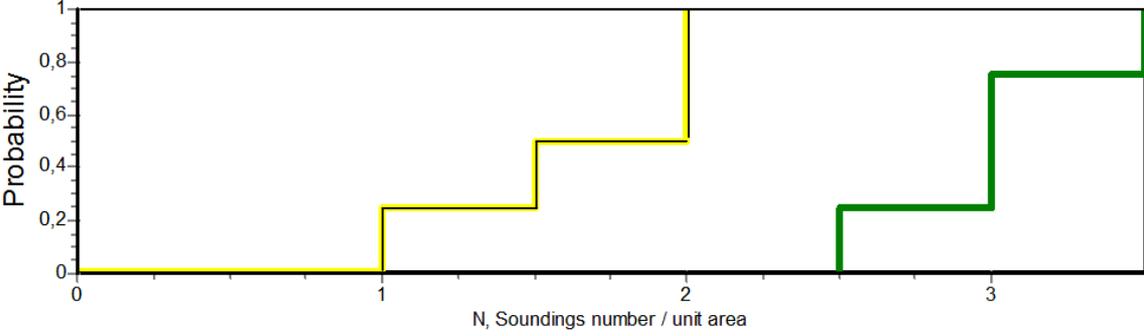


Fig. 7.8 Construction des probabilités supérieure et inférieure de fig.7.6 - Expert1( basé sur la variabilité du sol)

Lorsque plus d'un expert (source d'information) sont impliqués il y a lieu de faire une agrégation. Selon Hall et al.(2004) lorsque « n » ensembles aléatoires décrivent quelque variable x, chacun correspondant à une source d'information (expert) indépendante pour chaque élément focal A.

$$m(A) = \frac{1}{n} \sum m_i(A)$$

Dans ce cas si plusieurs ensembles aléatoires  $(A_i, m_i) : i = 1, \dots, n$  provenant de différentes sources ne contiennent pas les mêmes éléments focaux, un ensemble aléatoire moyen utilisant l'union et  $m(A)$  est obtenu de l'équation précédente.

D'autres règles de combinaison existent telles ; la règle de Dempster, la règle de Yager modifiée, la règle Inkagi unifié, celle de Dubois et Prade et autres (Sentz, 2002).

La règle de Dempster est la première formulée, elle fait suite à la formulation de la théorie de Dempster-Shafer. Elle combine diverses fonctions de croyance à travers leurs probabilités de base m. La combinaison  $m_{12}$  est calculée à partir de l'agrégation de deux probabilités de base  $m_1$  et  $m_2$ .

$$m_{12}(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C)}{1 - K} \quad \text{when } A \neq \emptyset$$

$$m_{12}(\emptyset) = 0$$

$$\text{où } K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C)$$

Lorsque le niveau de conflit entre experts augmente la règle de Yager modifiée pourrait être plus appropriée puisque le conflit n'est pas ignoré dans cette règle (Sentz and Ferson, 2002). Le résultat de l'agrégation est une fonction cumulative de distribution qui peut être utilisé comme outil d'aide à la décision.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cette section nous avons introduit le concept d'ensemble aléatoire et de probabilité subjective à utiliser dans l'estimation de la densité des sondages pour investigation géotechnique. Cette approche admet qu'un expert puisse donner un degré de croyance basé sur une certaine information préliminaire. Les probabilités imprécises admettent la

construction de boîte de probabilités supérieure et inférieure qui représentent ce degré de croyance et la plausibilité d'un événement.

Nous avons abordé le problème en utilisant les ensembles aléatoires, qui permettent de construire les probabilités « supérieure » et « inférieure ». En se basant sur l'information d'un paramètre d'entrée, la «variabilité du sol», nous avons utilisé une fonction objective linéaire pour construire les ensembles aléatoire et ainsi pouvoir construire les boîtes de probabilité sur la densité des sondages sur site. Le choix d'une fonction objective linéaire est dicté par la simplicité de sa construction. D'autres types de fonctions peuvent être utilisés selon les éléments d'information disponibles.

Nous avons montré, à travers un exemple, qu'il est possible de construire les probabilités supérieure et inférieure donnant une plage de valeurs de la densité de sondages à effectuer. Cet élément est déterminant lors d'une investigation géotechnique.

L'exemple traité considère un seul paramètre d'entrée influençant l'investigation géotechnique. La suite à donner à ce travail sera de construire des boîte de probabilités issues de l'agrégation de plusieurs paramètres. Des techniques spécifiques d'agrégation seront nécessaires.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Le travail de recherche initié dans le cadre de cette thèse a porté sur un aspect de l'ingénierie géotechnique qui reste encore à explorer, c'est la prise en compte de l'information qualitative pour l'investigation géotechnique. Le nombre de points de reconnaissance est un paramètre important tant sur le plan économique que sur le plan de connaissance d'un site. La réflexion a donc porté sur la mise en place d'un système d'aide à la décision qui permettrait d'optimiser la densité des points de reconnaissance tout en intégrant l'information qualitative et le jugement de l'ingénieur.

De part la documentation et les recherches menées jusque-là il nous a paru pertinent d'utiliser les ensembles flous, tant ils permettent une certaine flexibilité lorsque l'information est vague ou manquante. Un Système d'Inférence Flou a été développé pour tenir compte des incertitudes qui surviennent durant une campagne d'investigation géotechnique. L'idée principale est de reproduire le raisonnement de l'ingénieur pour évaluer le nombre de sondages nécessaires à une caractérisation fiable du sol. Différents paramètres intervenant dans ce genre de campagne doivent être pris en considération. L'information sur la géologie du site est une part importante. La nature du projet à construire et la topographie du site affectent la densité des sondages à effectuer. Les ensembles flous ont été utilisés pour représenter les paramètres de caractérisation du site avec la possibilité de considérer une information qualitative et linguistique. Ils permettent également de tenir compte des incertitudes qui existent dans ces paramètres. Le système d'inférence floue mis en place a consisté en un groupe de paramètres d'entrée comme nous l'avons mentionné, dont la géologie, la topographie, etc. et des paramètres de sortie (output) que nous avons exprimé sous forme de densité de sondages sur site. Chaque paramètre d'entrée contribue au poids de la décision finale. Le système d'inférence floue assemble toutes les influences et les défuzzifie en une valeur fixe, entre 0 et 1, représentant une densité (disposition) de sondages à compléter sur site. Les cas présentés montrent l'effet des différents paramètres, et révèlent l'efficacité des ensembles flous utilisés pour représenter les paramètres de

caractérisation de site. Le système d'inférence considère l'influence de chaque paramètre individuellement et calcule une densité optimale globale de sondages par rapport à un minimum recommandé par des codes de pratique.

Le résultat est donné sous forme de poids, indiquant la décision que l'ingénieur aura à prendre. Les recommandations disponibles (FHWA, 2002 ; Simons et al., 2002) donnent des indications sur le nombre de sondages requis pour caractériser un site, mais elles ne dépendent que des dimensions du projet à construire.

Dans une première approche (I) nous avons tenu compte du fait qu'un certain degré de confiance dans le SIF permet de relier, pour des cas connus, la densité (résultat)  $G$  à un nombre « optimal »  $N_{opt}$  de sondages. Le poids  $G_{min}$ , correspondant au nombre « minimal »  $N_{min}$  de sondages recommandé par les documents techniques, est alors déduit et utilisé plus tard en d'autres sites pour calculer le nombre de sondages qui nous intéresse.

Une seconde approche (II) a été également proposée, en calibrant un certain  $G_{ref}$  avec les recommandations  $N_{ref}$  des codes de pratique (Eurocode7, FHWA), ce qui permet de calculer directement le nombre de sondages optimal  $N_{opt}$  pour un site quelconque. Cette approche est différente de la première. Il n'est pas nécessaire, d'appliquer le SIF sur des cas connus pour pouvoir prédire  $N_{opt}$  sur de nouveaux sites.

Les exemples traités montrent que le Système d'Inférence Floue peut être utilisé comme un outil systématique d'aide à la décision pour les ingénieurs lorsqu'ils traitent de la caractérisation géotechnique de site. Ce système d'inférence est une étape qui vient au-delà des recommandations techniques sur le nombre « minimum » de sondages tel que spécifié par certains codes de pratique. Le système d'inférence flou indique à l'ingénieur si plus d'un nombre minimum, de sondages, est requis. Cependant, si on adopte la démarche I le poids  $G_{min}$ , à utiliser comme valeur standard, doit être calibré sur beaucoup de projets connus.

La démarche II quant à elle se passe de ce  $G_{min}$  à tirer de plusieurs cas, elle permet de quantifier de manière fiable et cohérente le nombre de sondages en se basant sur une valeur de  $G_{ref}$  calibrée avec les règlements (Eurocode7, FHWA). Les résultats obtenus à partir des applications, sont très encourageants et peuvent servir aisément l'ingénieur lors d'une investigation géotechnique.

Les résultats du SIF sont analysés en usant de la méthode Monte Carlo par la simulation de nombres de réalisations des paramètres d'entrée. Les nombres aléatoires sont générés avec des distributions uniformes de probabilité pour chaque paramètre d'entrée. Les résultats obtenus sont exprimés sous forme d'histogrammes et de distributions de probabilité. Nous avons noté que les résultats de l'output, lorsque tous les points des paramètres d'entrée sont pris en considération, ont une distribution de probabilité qui est bien approximée par une fonction de type « t-location scale ». Les résultats sont concentrés autour d'une valeur moyenne avec une certaine dispersion (écart-type) relativement faible.

Pour un site donné, au lieu d'utiliser des valeurs uniques pour chaque paramètre d'entrée nous avons utilisé des intervalles qui permettent de balayer plus de possibilités et de prendre en considération les incertitudes humaines. Des points aléatoires ont été générés dans chaque intervalle en utilisant la méthode Monte Carlo, avec des distributions uniformes de probabilité. Les longueurs des intervalles dépendent du jugement de l'ingénieur et de l'information disponible sur le paramètre en question.

L'intérêt d'utiliser des intervalles de valeurs pour l'input est de permettre la prise en considération des incertitudes humaines, ça aide également à considérer le manque d'information et procéder à une analyse plus pertinente des résultats du SIF.

Effectivement, pour allouer des valeurs aux paramètres d'entrée il serait plus facile à l'ingénieur d'utiliser des intervalles de valeurs que des valeurs uniques, même si dans ce cas les ensembles flous utilisent la notion de fonction d'appartenance. Dépendant des intervalles pris en compte, la moyenne et la dispersion (écart-type) des résultats ainsi que leur distribution en termes de probabilité permettent d'estimer le nombre optimal de sondages à effectuer sur site.

## **QUELQUES PERSPECTIVES**

La recherche entamée dans le cadre de cette thèse de Doctorat est un premier pas vers la systématisation des procédures d'investigation géotechnique, notamment en ce qui concerne l'estimation de la densité des points de reconnaissance sur un site. L'intégration de l'information qualitative et du jugement de l'ingénieur n'est pas aisée et reste sujette à d'autres approches complémentaires, telles les ensembles aléatoires et les probabilités imprécises (Bernardini & Tonon, 2010). Les outils de la logique floue

utilisés dans ce travail se sont avérés efficaces et proches du raisonnement de l'ingénieur lorsqu'il est confronté des décisions tenant compte de son propre jugement en présence d'une information incomplète et vague.

Le Système d'Inférence Flou mis en place ne saurait fonctionner correctement que si les ensembles flous le constituant sont construits de la manière la plus adéquate possible. C'est cette démarche là que nous avons adoptée, en nous basant sur les données disponibles et des questionnaires (Boumezerane, 2010), pour construire ces ensembles. L'un des points essentiels de ce travail étant la construction de ces ensembles flous, de manière à ce qu'ils reflètent la réalité le plus objectivement possible.

Aussi la traduction des résultats du SIF en une densité de sondages a constitué un challenge important en se basant sur une approche logique inédite.

D'autres outils mathématiques sont apparus au cours de ce travail de recherche, et nous pensons qu'ils pourraient constituer d'efficaces atouts pour intégrer le jugement de l'ingénieur lors d'une investigation géotechnique. Citons les ensembles aléatoires et les probabilités imprécises (Bernardini & Tonon, 2010), ils permettent aussi de prendre en considération l'aspect vague et incertain de l'information qu'on rencontre dans les sols. Comme perspective de travail nous pensons que la combinaison de la logique floue et des probabilités imprécises constituerait un atout important. La comparaison entre les résultats de l'une et l'autre de ces méthodes constituerait un point de départ.

Si la densité des sondages est importante dans la mesure où elle permet de caractériser un site convenablement, la profondeur des points de reconnaissance constitue également un aspect large et appréciable d'une recherche à mener à l'avenir. La modélisation de la variabilité des conditions de sols en profondeur fait l'objet de recherches continues. Le challenge qui reste à compléter est de combiner entre la densité de sondages sur site et la variabilité en profondeur des caractéristiques du sol.

## BIBLIOGRAPHIE

Alvarez Marín D. A., 2008. Infinite Random Sets and Applications in Uncertainty Analysis. PhD Thesis. Unit of Engineering Mathematics. University of Innsbruck, Austria.

Ammar Salwa H., 1989. Determining the 'best' decision in the presence of imprecise information. *International Journal of Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 29.

Auvinet, G., Juarez, M., Medina-Cetina, Z., 2001. Geostatistical interpretation of soil Exploration in lacustrine clays. Proceedings of the *XIII Conference of the International Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Istanbul.

Ayyub Bilal M., 2001. Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks, CRC Press.

Baecher G.B., 1984. Just a few more tests and we'll be sure! Probabilistic characterization of Soil Properties: Bridge between Theory and Practice, ASCE, New York, 1-18.

Baecher G. & T. Christian, 2003. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. Wiley Ed.

Baecher G.B., 1998. Parameters and approximations in geotechnical reliability. In: Ayyub BM, editor. Uncertainty modeling and Analysis in Civil Engineering. Florida: CRC Press; P. 479-499.

Baguelin F. & J.B. Kovarik, 2000. Une méthode de détermination des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques, *Revue Française de Géotechnique* N°93.

Bernadini A. & F. Tonon, 2010. Bounding Uncertainty in Civil Engineering, Theoretical Background. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Boissier D., 2000. Décision et incomplétude. *Revue Française de Géotechnique* N°93, 81-92.

Bouchon-Meunier, B., 1995. La logique floue et ses applications. Addison-Wesley France SA.

Bowles J.E., 1977. Foundation Analysis and Design. McGraw- Hill Publishing Co. New York.

Caffaro F. & C. Cherubini, 2002. Large Sample Spacing in Evaluation of Vertical Strength Variability of Clayey Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128, July, 558-568.

Cambefort H., 1980. Géotechnique de l'Ingénieur, reconnaissance des sols", Eyrolles Editeur - Paris.

Chameau J.L. & J.C. Santamarina, 1987. Membership Functions I: Comparing Methods of Measurement. *International Journal of Approximate Reasoning*, 287-301.

Chowdhury R.N., W.H. Tang and I. Sidi, 1987. Reliability model of progressive slope failure. *Géotechnique* 37, N°4, 467-481

Christakos G., 1985. Modern Statistical Analysis and Optimal Estimation of Geotechnical Data. *Engineering Geology* 22, 175-200

Chuang P.H., 1995. Use of fuzzy sets for evaluating shear strength of soils. *Computers and Geotechnics* 17, 425-446.

Clayton C.R.I., M.C. Matthews and N.E. Simons, 2005. Site Investigation. Department of Civil Engineering, University of Surrey.

Das B., 2006. Principles of Geotechnical Engineering. Thomson Learning.

De Finetti B., 1931. Sul significato soggettivo della probabilita. *Fundamenta Mathematicae* 7, 298-329.

Dempster A.P., 1967. Upper and Lower Probability induced by a multivalued mapping, *Ann. Math. Stat.* 38 (2), 325-339.

Du K.L. & M. N. S. Swamy, 2006. Fuzzy Logic and Neurofuzzy Systems - in Neural Networks in a Softcomputing Framework , Springer.

Duncan, M.J., 2000. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. April, 307-316

Eurocode7, 1997. Calcul géotechnique - Partie1, Règles Générales - Section3, Données Géotechniques. ENV 1997-1. AFNOR 1996.

Farmer I.W., G.C. Xiao and P.G. Challinor, 1996. Spatial dependence in site investigation design - in Advances in site investigation practice C.Graig, Proceedings of the *International Conference on Advances in Site Investigation Practice*. Thomas Telford Edition.

Fetz J., J. Jäger, D. Köll, G. Krenn, H. Lessmann, M. Oberguggenberger and R.F. Stark, 1999. Fuzzy Models in Geotechnical Engineering and Construction Management. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 14 (2), 93-106.

FHWA, 1997. Subsurface Investigations: Training Course in Geotechnical and Foundation Engineering. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Report FHWA-HI-97-021.

FHWA, 2002. Sabatini P.J., R.C. Bachus, P.W. Mayne, J.A. Schneider and T.E. Zettler, Geotechnical Engineering Circular 5 (GEC5) - Evaluation of Soil and Rock Properties, Report No FHWA-IF-02-034. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2002.

Fuller R., 1998. Fuzzy Reasoning and Fuzzy Optimization. Turku Center for Computer Science. Abö, Finland.

Gajzler M., 2004. The Use of Fuzzy Logic in Decision-making Systems. *Foundations of civil and environmental engineering* No. 5. Publishing House of Poznan University of Technology, Poznań.

- Genske D.D. & K. Heinrich, 2009. A Knowledge-based Fuzzy Expert System to Analyze Degraded Terrain. *Expert Systems with Applications*, Volume 36, Issue 2, Part 1, March, 2459-2472
- Giasi C.I., Masi P. and C. Cherubini, 2003. Probabilistic and fuzzy reliability analysis of a sample slope near Aliano. *Engineering Geology* 67, 391-402.
- Dodagoudar G.R. & G. Venkatachalam, 2000. Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory. *Computers and Geotechnics* 27, 101-115
- Greenwood J.R., 2005. *Engineering Geology, Site and Ground Investigation*. Elsevier Ltd.
- Hall J.W., Rubio E. and M.G. Anderson, 2004. Random sets of probability measures in slope hydrology and stability analysis. *ZAMM Z. Angew. Math. Mech.* **84**, No. 10-11, 710 - 720.
- Halpern J.Y., 2003. *Reasoning about Uncertainty*. The MIT Press, Cambridge, England.
- Helton J. C., 1997. Uncertainty and Sensitivity Analysis in the Presence of Stochastic and Subjective Uncertainty. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 57, 3-76
- Hu Z., C.W. Chan and G.H. Huang, 2003. A fuzzy expert system for site characterization. *Expert Systems with Applications* 24, 123-131.
- Huang Y.T. & T.J. Siller, 1997. Fuzzy Representation and Reasoning in Geotechnical Site Characterization. *Computers and Geotechnics* Vol.21, No1, 65-86.
- Hunt R.E., 2007. *Geotechnical Investigation Methods : a field guide for geotechnical engineers*. Taylor & Francis Group LLC.
- Jaksa M., 1998. *Geotechnical Risk and Inadequate Site Investigations: a case study*. Department of Civil and Environmental Engineering, the University of Adelaide.
- Jaksa M.B, W.S. Kaggwa, G.A. Fenton and H.G. Poulos, 2003. A framework for quantifying the reliability of geotechnical investigations. *Application of Statistics and Reliability in Civil Engineering*, Der Kiuregian, Madanat & Pestana,(eds), Rotterdam.
- Jang J.S.R & N. Gulley, 1997. *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. The MathWorks Inc.
- Kanungo D.P., M.K Arora, S. Sarkar, and R.P. Gupta, 2006. A comparative study of conventional ANN-black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology* 85, 347-366.
- Klir G.J., M. J. Wiermann, 1998. *Uncertainty-Based Information, Elements of Generalized Information Theory*. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Kumari Sudha, M. Israil, S. Mittal and J. Rai, 2009. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics* 67, 74-79.
- Liao S.S.C., D.L. Druss, T.L. Neff and B.R. Brenner, 1996. Just One More Boring, and We'll Know For Sure. *Uncertainty in Geologic Environment, Uncertainty96'*, Balkema.

Magnan J.P., 2000. Quelques spécificités du problème des incertitudes en géotechnique. *Revue Française de Géotechnique* 93, 3-9.

Marache A., D. Breysse, C. Piette and P. Thierry, 2009. Geotechnical modeling at the city scale using statistical and geostatistical tools: The Pessac case (France). *Engineering Geology* Volume 107, Issues 3-4, August, 67-76.

Matheron G., 1963. *Traité de Géostatistique appliquée*. Technip, Paris.

MATLAB, 2008. *Fuzzy Logic Toolbox 2, User's Guide*. The MathWorks Inc.

Möller B. & M. Beer, 2004. *Fuzzy Randomness - Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics*. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Nathanail C.P. & M.S. Rosenbaum, 1998. Spatial management of geotechnical data for site selection. *Engineering Geology* 50, Issues 3-4, October, 347-356.

Nawari N.O. & R. Liang, 2000. Fuzzy-based approach for determination of characteristic values of measured geotechnical parameters. *Canadian Geotechnical Journal* 37, 1131-1140

Oberguggenberger M., 2005. Mathematics of uncertainty ; models , methods and interpretations. in Felin W., Oberguggenberger M., Vieider R. (Eds). *Analyzing Uncertainty in Civil Engineering*, Springer Verlag 2005

Oberguggenberger, M. & W. Fellin, 2002. From probability to fuzzy sets: The struggle for meaning in geotechnical risk assessment. *Proceedings of International Conference on Probabilistics in Geotechnics - Technical and Economical Risk Estimation*, Essen: VGE, 29 - 38.

Parsons R.L. & J.D. Frost, 2002. Evaluating Site Investigation Quality using GIS and Geostatistics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, June, 451-461.

Peck(1980)

Pitilakis K., 2006. Site Effects. In: Ansal A, Editor. *Recent advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation*. Springer, 139-197

Rahman M.S. & K.M. El-Zahaby, 1997. Probabilistic liquefaction risk analysis including fuzzy variables. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 16, 63-79

Romo M.P. & S.R. Garcia, 2003. Neurofuzzy mapping of CPT values into soil dynamic properties. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23, 473-482

Ross T. J., J.M Booker and W. J. Parkinson, eds. 2002. *Fuzzy Logic and Probability Applications-Bridging the Gap*. ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability, SIAM, Philadelphia, ASA, Alexandria, VA.

Saboya F.J.R., M.G. Alves and W.D. Pinto, 1989. Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic. *Engineering Geology* 86, 211-224.

Santamarina, J.C. & J.L. Chameau, 1989. Limitations in decision making and system performance. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 3(2), 78-86.

Schönhardt M. & K.J. Witt, 2003. Adaptive Ground Modelling in geotechnical engineering. Proceedings of the *International Symposium on Geotechnical Measurements and Modelling*, 23-25 September 2003, 297-305, Balkema Publishers Karlsruhe (Germany).

Sentz K. & S. Ferson, 2002. Combination of Evidence in Dempster- Shafer Theory, SANDIA Report, SAND2002-0835, April 2002.

Shafer G., 1976. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton: Princeton University Press.

Shahin M., M. Jaksa and H. Maier, 2001. Applications of Artificial Neural Networks in Foundation Engineering.

Simons, N., Menzies, B., Matthews, M., 2002. A Short course in Geotechnical Site Investigation. Thomas Telford Ed.

Strater, N.H., mckown, A.F., 2002. Draft Report on preliminary geotechnical studies, Proposed Beverly High School Building Addition, Beverly, Massachusetts. Haley & Aldrich Inc., Boston Massachusetts, June 2002, file N° 28022-001.

Sung Eun Cho (2007) Effects of spatial variability of soil properties on slope stability Engineering Geology 92 (2007) 97-109

Tang, W.H., 1993. Recent developments in geotechnical reliability. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Li & Lo Eds., Balkema Rotterdam.

Thielen A., S. Friedel, M. Plötze and S.M. Springmann, 2005. Combined approach for site investigation in terms of the analysis on rainfall induced landslides. 16th *ICSMGE* Sept. 12-16, Osaka, ISSMGE, 2591-2594.

U.S. Corps of Engineers, 1994. Geotechnical Investigation, Report N° EM 1110-2-2504, March 1994.

U.S.G. (Union Syndicale Géotechnique), 2005. Projet de recommandations sur la consistance des investigations géotechniques pour la construction de bâtiments, version 18/01/2005.

U.S Army Corps of Engineers, 2001. Engineer manual, geotechnical Investigations- Engineering and design. EM 1110-1-1804 1 January 2001.

Van Raalte G.H, 1999. Can dredging industry rely on geotechnics - in Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure. Editors; F.B.J Barends, J. Lindenberg, H.J. Luger, L. De Quelerij, A.Verruijt, Vol.2,

Vanmarcke E.H., 1977. Probabilistic modeling of soil profiles. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*.

Wuben L., 1993. Imprecise probability and decision in civil engineering – Dempster-Shafer Theory and application. Phd Thesis, The University of British Columbia.

Zadeh L.A., 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control* 8, 338-353.

Zadeh L.A., 1975. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning - I, *Information Sciences* 8:3, 199-249.

Zadeh L.A., 1973. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-3, N°1, January.