

République Algérienne Démocratique et populaire  
Ministère De L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

## Ecole Nationale Supérieure Polytechnique



**Ecole Doctorale Ingénierie et Environnement**  
**Option : Construction et Environnement**

### Mémoire de Magister

*Présenté par*

Mme MECHKARINI née Adjal Leila

Ingénieur en Génie Civil

### **Thème**

**CONCEPTION D'UN OUTIL D'AIDE POUR L'ANALYSE DES  
RESULTATS DES ESSAIS GEOTECHNIQUES IN SITU**

Soutenu Le 10/ 01/ 2011 devant le jury :

A. BALI	Professeur, ENP	Président
K. SILHADI	Maître de conférences (ENP)	Directeur du Mémoire
S. BELKACEMI	Maître de conférences (ENP)	Examinateur
M.MORSLI	Maître de conférences (ENP)	Examinatrice

تركز هذه الدراسة على تصميم نظام خبير لتحليل نتائج الاختبارات الجيوتقنية في الميدان. هذه الدراسة وجهتنا إلى بحث مستفيض في كل ما يتعلق بميدان الدراسة الجيوتقنية. هذا البحث يتيح لنا معرفة واسعة والاستدلال على الاختبار الميداني ، وتحليل نتائج الاختبارات الجيوتقنية في الموقع يتيح عادة حساب قدرة تحمل الاساسات السطحية ، والاساسات العميقة وما إلى ذلك ، الا اننا وجهنا " مركز القواعد" الى كيفية حساب قدرة تحمل الاساسات السطحية من الاختبار ثابت الاختراق. لتسهيل تنفيذ هذا النظام ، تم استخدامه لمولد (شل) نظام خبير كمبيوتر ، ويدعى Kappa-Pc. مع هذا الأخير تم تأسيس نموذج لتمثيل المعرفة وتحليل نتائج التجارب الجيوتقنية المختلفة في الموقع ، ولا سيما في حساب قدرة تحمل الاساسات السطحية عن طريق اختبار ثابت الاختراق. المولد kappa-pc يسمح بتمثيل وجوه التجارب المختلفة، بواسطة قواعد الانتاج المعرفة ، وهذه المناهج نظام خبير واعدة جدا في مجال الهندسة الجيوتقنية حيث المهندس يجب أن تأخذ دائما قرارات قد لا تعتمد على نماذج رسمية للتحليل ، ولكن يعتمد فقط على خبرته الشخصية .

**كلمات البحث :** نظام الخبير ، الذكاء الاصطناعي ، مولد نظام خبير ، مجموعة الأوامر، وجوه وجوه الطبقة ، لاختبار الميداني ، اختبارات ثابت الاختراق.

### **Résumé :**

La présente étude porte sur la conception d'un système expert pour l'analyse des résultats des **essais géotechniques in situ**.

La conception de notre système expert, nous oriente vers une recherche approfondie sur tout ce qui est en relation avec le domaine de la reconnaissance géotechnique. Cette recherche nous permet d'avoir de larges connaissances opératoires et heuristiques dans le domaine de la reconnaissance du sol, plus précisément dans le cadre des essais in situ.

L'analyse des résultats des essais géotechniques in situ porte en général sur le calcul de la capacité portante des fondations superficielles, des fondations profondes, de l'estimation des tassements etc.

Toutefois, nous avons orientés la partie « base de règles » sur le calcul de la capacité portante des fondations superficielles à partir de l'essai de pénétration statique. Pour faciliter l'implémentation du système, on a eu recours à un générateur (Shell) de système expert nommé **Kappa-Pc**.

Grâce à ce dernier il a été établi un modèle de représentation des connaissances nécessaires à l'analyse des résultats des différents essais géotechniques in situ, en particulier le calcul de la portance des fondations superficielles à partir de l'essai de pénétration statique. Le générateur Kappa-Pc permet une représentation orientée objet pour la description des différents essais, ainsi que des règles de production pour les connaissances opératoires. Ces nouvelles approches (SE) sont très prometteuses dans le domaine de la géotechnique, où l'ingénieur doit toujours prendre des décisions sans pouvoir se baser sur des modèles d'analyse formels, mais en ne se fiant qu'à son expérience personnelle et à son intuition.

**Mots clés :** Système expert, intelligence artificielle, générateur de système experts, base de règles, objet et classe d'objet, essai in situ, essai de pénétration statique .

### **ABSTRACT:**

This study focuses on the design of an expert system for analyzing the results of **In situ geotechnical tests**.

The design of our expert system, directs us to a thorough research on everything that is related to the field of geotechnical.

This research provides us with extensive operative knowledge and heuristics in the area of the site investigation, specifically in the field test. The analysis of the results of in situ geotechnical testing usually covers calculating the bearing capacity of shallow foundations, deep foundations, estimate settlements and so on. However, we have directed the "basic rules" on how to calculate the bearing capacity of shallow foundations from the cone penetration test.

To facilitate the implementation of the system, we used a generator (Shell) expert system called **Kappa-Pc**.

With the latter it was established a model of knowledge representation for the analysis of results of different in situ geotechnical tests, in particular the calculation of bearing capacity of shallow foundations from the cone penetration test. Generator Kappa-PC provides an object-oriented representation for describing the various tests, and production rules for knowledge operative. These approaches (SE) are very promising in the field of geotechnical engineering which must always take decisions may not rely on formal models of analysis, but trusting only personal experience and intuition.

**Keywords:** expert system, artificial intelligence, expert system generator, rule base, object and object class, essai in situ, penetration test.

## **REMERCIEMENTS :**

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon directeur de recherche Monsieur **Kamel Silhadi**, Maître de conférence au département Génie Civil de l'ENP qui m'a apporté tout le long de ces années de recherche un soutien et des conseils des plus bénéfiques et instructifs.

Je tiens aussi à formuler ma plus vive reconnaissance au professeur Monsieur **Abderrahim Bali, Drecteur** de l'Ecole Doctorale Ingénierie et Environnement.

Mes plus sincères remerciements s'adressent aussi à Messieurs les membres du Jury chargés d'examiner ce travail.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Ibrahim Mahfoudhi Doctorant au sein du Département Génie Civil de l'ENP.

Mes remerciements les plus sincères vont aussi à :  
Mme F Debbiche, Mme Khettab, du Département Génie Civil de l'ENP.

A toute l'équipe du LCTP - Laboratoire Central Des Travaux Publics  
H- DEY, ALGER- en l'occurrence :  
Monsieur Mezdad Directeur Technique,  
Monsieur Menchi Ingénieur d'Etat en Travaux Publics,  
Melle Barça Ingénieur en Travaux Publics.

Enfin, j'adresse toute ma sincère gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé et soutenu dans mon travail.

Mme Leila MECHKARINI.

*À la mémoire de ma mère.*

*Baya, qui a été toujours la source de toute mon énergie  
par son affection et son sacrifice.*

*À la mémoire de mon père.*

*Ahmed, que je n'ai pas connu.*

*À la mémoire de ma grand-mère paternelle Fatima.*

*Je dédie ce travail :*

*À mon oncle paternel Nordine.*

*À mon cher mari Omar.*

*À toute ma famille Adjal et ma belle famille*

*Mechkarini.*

*Pour Asma,*

*Pour Meriem,*

*Pour Faten.*

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	5
----------------------------	---

## CHAPITRE I

### « ETUDE THEORIQUE DES SYSTEME EXPERTS »

I-1-INTRODUCTION.....	7
I-2-ACQUISITION DE CONNAISSANCE.....	7
I-3-ETUDE THEORIQUE DES SYSTEMES EXPERTS.....	7
I-3-1-Définition d'un Système Expert .....	7
I-3-2- Historique.....	7
I-3-3-Développement et amélioration des SE.....	8
I-3-4- Caractéristiques d'un système expert.....	8
I-3-5-Rôle d'un système expert .....	9
I-3-6-Les principaux composants d'un système expert.....	9
I-3-6-1- La base de connaissance BC.....	10
I-3-6-2- Le moteur d'inférence MI.....	11
I-3-6-3- Interface.....	12
I-3-7-Système expert = automatisation de la logique.....	13
I-3-7-1-Logique classique .....	13
I-3-7-2-Logique floue.....	13
I-3-8-Mise en œuvre d'un SE.....	13
I-3-9-Les générateurs d'un SE .....	14
I-3-10-Avantages et inconvénients des SE.....	16
I-4-LES SYSTEMES EXPERTS ET LA GEOTECHNIQUE .....	17
I-4-1- Spécificités du domaine géotechnique .....	17
I-4-1- 1-Hétérogénéités .....	17
I-4-1- 2-Difficulté pour avoir la connaissance .....	17
I-4-2-Comment envisager un système d'aide : une approche .....	17

## CHAPITRE II

### « RECONNAISSANCE PRIMAIRE ET ETUDE GEOPHYSIQUE»

II-1- INTRODUCTION .....	18
II-2- NORMES ET ESSAIS GEOTECHNIQUES EN ALGERIE.....	18
II-3- DEMARCHE DE L'ETUDE.....	18
II-4-DEFINITIONS .....	19
II-4-1-Définition du Sol .....	19
II-4-2- Structure du sol .....	19
II-4-3- L'Etat d'un sol .....	19
II-4-4- Comportement d'un sol .....	19

<b>II-5- LES ETAPES D'UNE RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE .....</b>	<b>20</b>
<b>II-6- METHODOLOGIE D'UNE ETUDE DE SOL .....</b>	<b>20</b>
<b>II-6-1- Reconnaissance Primaire .....</b>	<b>20</b>
<b>II-6-1-1 - Moyens de la reconnaissance primaire .....</b>	<b>20</b>
<b>II-6-1-1-1- Inspection visuelle du site .....</b>	<b>20</b>
<b>II-6-1-1-2- Recueil de la documentation existante .....</b>	<b>21</b>
<b>II-6-1-1-3- Etude topographique.....</b>	<b>21</b>
<b>II-6-1-1-4- Reconnaissance géologique .....</b>	<b>21</b>
<b>II-6-1-1-5- Photographie aérienne .....</b>	<b>21</b>
<b>II-6-1-1-6- La sismicité régionale .....</b>	<b>22</b>
<b>II-6-1-1-7- Reconnaissance hydrogéologique .....</b>	<b>22</b>
<b>II-7- ETUDE GEOPHYSIQUE .....</b>	<b>22</b>
<b>II-7-1- Choix de la méthode de mesure .....</b>	<b>22</b>
<b>II-7-2- Les principales méthodes géophysiques .....</b>	<b>23</b>
<b>II -7-3- La méthode sismique .....</b>	<b>23</b>
<b>II-7-4- La méthode électrique .....</b>	<b>24</b>
<b>II-7-5- Prospection gravimétrique .....</b>	<b>25</b>
<b>II-7-6- Méthodes électromagnétiques .....</b>	<b>25</b>
<b>II-7-7- Méthodes magnétiques .....</b>	<b>25</b>
<b>II-7-8- Conclusion .....</b>	<b>26</b>

### **CHAPITRE III**

#### **« ESSAIS GEOTECHNIQUES IN SITU »**

<b>III-1- INTRODUCTION .....</b>	<b>27</b>
<b>III-2- LE SONDAGE .....</b>	<b>27</b>
<b>III-2-1-Introduction .....</b>	<b>27</b>
<b>III-2-2 Types de sondages .....</b>	<b>27</b>
<b>III-2-2-1-Sondages destructifs .....</b>	<b>27</b>
<b>III-2-2-2-Sondage carotte .....</b>	<b>28</b>
<b>III-2-3- Nombre et profondeur de sondage .....</b>	<b>28</b>
<b>III-3-ESSAI DE PENETRATION STATIQUE CPT .....</b>	<b>29</b>
<b>III-3-1-Historique .....</b>	<b>29</b>
<b>III-3-2-Le pénétromètre statique .....</b>	<b>29</b>
<b>III-3-3-Pénétrromètres à cône mobile .....</b>	<b>29</b>
<b>III-3-4-Pénétrromètres à cône fixe .....</b>	<b>30</b>
<b>III-3-5-Appareillage .....</b>	<b>30</b>
<b>III-3-6-Description du pénétromètre Gouda .....</b>	<b>30</b>
<b>III-3-7-Principe et réalisation de l'essai de pénétration statique .....</b>	<b>30</b>
<b>III-3-8-Calcul de la portance d'une fondation superficielle .....</b>	<b>31</b>
<b>III-3-9- Calcul de la portance d'une fondation profonde .....</b>	<b>31</b>
<b>III-3-9- 1-Calcul de contrainte limite de pointe qp d'un pieu à partir de Rp .....</b>	<b>31</b>
<b>III-3-9- 2- Calcul de frottement latéral unitaire limite f sur le fut d'un pieu .....</b>	<b>33</b>
<b>III-3-10- Ordre de grandeur Rp selon le terrain .....</b>	<b>34</b>
<b>III-3-11- Limites d'un essai de pénétration statique .....</b>	<b>34</b>
<b>III-3-12- Conclusion .....</b>	<b>34</b>

<b>III-4-ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE .....</b>	<b>34</b>
III-4-1-Historique .....	34
III-4-2- Domaine d'utilisation .....	34
III-4-3-Types de pénétromètre dynamique .....	35
III-4-4-Principe et réalisation de l'essai .....	36
III-4-5- Présentation des résultats .....	37
III-4-6- Interprétation de l'essai de pénétration dynamique .....	37
III-4-7- Détermination de la contrainte admissible d'un sol de fondation à partir d'un essai au pénétromètre dynamique .....	37
III-4-8-Conclusion .....	38
<b>III-5- ESSAI DE PENETRATION STANDARD (S.P.T) .....</b>	<b>38</b>
III-5-1-Historique .....	38
III-5-2-Appareillage .....	38
III-5-3-Présentation des résultats .....	39
III-5-4-Correction à apporter à la valeur de N .....	39
III-5-4-Correction à apporter à la valeur de N.....	39
III-5-5-Fondation superficielle dans du sable (calcul de $q_a$ à partir de N) .....	39
III-5-6- Fondations superficielles dans l'argile .....	42
III-5-7-Fondation profonde .....	42
III-5-8-Conclusion sur l'essai S.P.T. ....	42
<b>III-6-ESSAI PRESSIOMETRIQUE .....</b>	<b>42</b>
III-6-1- Historique.....	43
III-6-2-Pressiomètre .....	43
III-6-3-Principaux types d'appareils .....	44
III-6-4- Principes et hypothèses de l'essai pressiométrique .....	44
III-6-5- Réalisation d'un essai pressiométrique .....	44
III-6-6- Résultats des essais pressiométriques .....	45
III-6-6-1- Courbe pressiométrique .....	45
III-6-6-2- Paramètres obtenus dans un essai pressiométrique .....	46
III-6-7 Utilisation des résultats pressiométriques .....	47
III-6-7-1- Capacité portante d'une fondation superficielle .....	47
III-6-7-2-Capacité portante des fondations profondes .....	50
III-6-8-Conclusion .....	51
<b>III-7-ESSAI SCISSOMETRIQUE .....</b>	<b>52</b>
III-7-1- Historique .....	52
III-7-2- Scissomètre .....	52
III-7-3- Différents types de scissomètre.....	52
III-7-4- Appareillage .....	53
III-7-5- Principes et réalisation de l'essai scissométrique .....	53
III-7-6-Interprétation de l'essai scissométrique .....	54
III-7-7-Limitations de l'essai au scissomètre .....	55
<b>III-8-CONCLUSION DU CHAPITRE III .....</b>	<b>55</b>

## CHAPITRE IV

### « Méthodes de représentation de la connaissance et application à KAPPA-PC »

IV-1- INTRODUCTION .....	60
IV-2-LES MODES DE REPRESENTATION DE LA CONNAISSANCE. ....	61
IV-3- LES OBJETS ET LES CLASSES D'OBJETS .....	62
IV-4-LES CLASSES ET OBJETS DANS KAPPA. PC .....	64

## CHAPITRE V

### « REPRESENTATION ET STRUCTURATION DES CONNAISSANCES POUR L'INTERPRETATION DES ESSAIS GEOTECHNIQUE IN SITU »

V-1- INTRODUCTION .....	66
V-2- HYPOTHESES ET LIMITES DE FONCTIONNEMENT DE NOTRE SE .....	66
V-3- LA REPRESENTATION DE LA CONNAISSANCE DANS NOTRE SE.....	67
V-4- SCHEMA CONCEPTUEL DES CLASSES ET OBJETS DE NOTRE SYSTEME EXPERT .....	68
V-5-DESCRIPTION DE LA CLASSE D'OBJET Site .....	69
V-6-DESCRIPTION DE LA CLASSE D'OBJET Bloc .....	71
IV-7-CLASSE D'OBJET FondationsSuperficielles .....	73
V-8-CLASSE D'OBJET Couche .....	75
IV-9-CLASSE D'OBJET Essai De Pénétration Statique .....	76
V-10- REGLES DE PRODUCTION DANS KAPPA-PC .....	78
V-10-1- Exemple de Règles.....	78
V-10-2-Les règles dans notre SE.....	79
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>89</b>
ANNEXES 1.....	93
ANNEXES 2.....	98
ANNEXES 3.....	113
ANNEXES 4.....	114

# LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Processus de développement et d'amélioration du savoir faire grâce au SE.....	8
Figure I-2 : La représentation la plus simple d'un système expert.....	9
Figure I-3 : Structure d'un système expert.....	10
Figure I-4 : Schéma général de fonctionnement d'un moteur d'inférence.....	11
Figure I-5 : L'écran de KAPPA-PC version 2.4.....	15
Figure II-1 : Emetteur d'onde (camion vibreur) .....	24
Figure II-2 : Récepteurs d'ondes (géophones) .....	24
Figure II-3 : Résistivimètre.....	24
Figure II-4 : principe d'un gravimètre.....	25
Figure III-1 : Carottiers motorisés pour le sondage et l'échantillonnage de sols.....	28
Figure III-2 : Carottiers manuels pour l'échantillonnage non remanié de sédiments en bassin. ....	28
Figure III-3 : Pénétrromètre Gouda 200 KN porté sur camion .....	29
Figure III-4 : Détermination de la résistance de pointe par la méthode de Begemann .....	32
Figure III-5 : Détermination de la résistance de pointe par la méthode de Van der Ween....	32
Figure III-6 : Vue d'ensemble d'un pénétrromètre .....	36
Figure III-7 : Schéma de principe de l'essai au pénétrromètre dynamique .....	36
Figure III-8. Schéma d'une semelle sans surcharge latérale.....	40
Figure III-9 : Schéma d'une semelle avec surcharge latérale. ....	40
Figure III-10 : Contrainte admissible pour que le tassement absolu reste inférieur à 2,5 cm.. ....	41
Figure III-11 : Pressiomètre avec une sonde mono cellulaire .....	43
Figure III-12 : Procédure d'essai type Menard.....	45
Figure III-13 : Courbe pressiométrique brute -TYPE MENARD.....	45
Figure III-14 : Principe de calcul du module pressiométrique $E_m$ .....	47

<b>Figure-III-15 : Facteur de portance en fonction de l'encadrement.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure-III-16 : Détermination de la pression limite équivalente.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure-III-17 : Capacité portante d'un pieu.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure-III-18 : Frottement latéral négatif.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure-III-19 : Scissomètre.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure-III-20 : Scissomètre modèle H-60 avec palettes interchangeable.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure-III-21 : Cu en fonction de l'angle de rotation.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure IV-1 : Représentation de la connaissance.....</b>	<b>60</b>
<b>Figure IV-2 : Graphe d'héritage des classes et objets du système expert développé.....</b>	<b>64</b>
<b>Figure IV-3 : Editeur de la classe d'objet FondationsSuperficielles et de l'attribut Type.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure V-1 : schéma conceptuel de la base d'objets de notre SE.....</b>	<b>68</b>
<b>Figure V-2 : délimitation du projet et illustration de ses deux points représentatifs.....</b>	<b>69</b>
<b>Figure V-3 : délimitation du bloc et illustration de ses deux points représentatifs.....</b>	<b>71</b>

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : Normes Algériennes.....	18
Tableau II-2 : différentes méthodes géophysiques.....	23
Tableau II-3 : récapitulatif de l'utilisation des méthodes géophysiques .....	26
Tableau III-1 : les valeurs de coefficient K selon la nature de terrain .....	33
Tableau III-2 : Valeurs de Rp selon le terrain .....	34
Tableau III-3 : les valeurs de $q_a$ en fonction de la compacité du sable.....	41
Tableau III-4 : les valeurs de $q_a$ en fonction de la compacité du sable.....	42
Tableau III-5 : Catégories de sols.....	48
Tableau III-6 : les résultats d'un essai de pénétration statique et ses limites.....	55
Tableau III-7 : les résultats d'un essai de pénétration dynamique et ses limites.....	56
Tableau III-8: les paramètres déduits à partir d'un essai CPT.....	56
Tableau III-9 : les paramètres déduits à partir d'un essai de pénétration dynamique.....	56
Tableau III-10 : les résultats d'un essai SPT et ses limites.....	57
Tableau III-11 : les paramètres déduits à partir d'un essai SPT.....	57
Tableau III-12 : les résultats d'un essai pressiométrique et ses limites.....	58
Tableau III-13 : les résultats d'un essai scissométrique et ses limites.....	58
Tableau III-14 : les paramètres déduits à partir d'un essai scissométrique.....	59
Tableau III-15 : les paramètres déduits à partir d'un essai pressiométrique.....	59
Tableau IV-1 : Les différents modes de représentation de la connaissance.....	61
Tableau V-1 : Description des attributs de la classe d'objets Site .....	70
Tableau V-2 : Description des attributs de la classe d'objets Bloc.....	72
Tableau V-3 : Description des attributs de la classe d'objets FondationsSuperficielles .....	74
Tableau V-4 : Description des attributs de la classe d'objets Couche .....	75
Tableau V-5 : Description des attributs de la classe d'objet EssaiDePénétrationStatique.....	77

## **INTRODUCTION GENERALE :**

Dans la reconnaissance des sols destinés à recevoir des projets de construction, les essais géotechniques in situ permettent d'obtenir des informations sur l'état du sol, de préciser l'organisation des différentes couches et de dériver les paramètres mécaniques à leur attribuer afin de passer au calcul des ouvrages.

Avant de choisir les méthodes à utiliser, une première étape s'impose, c'est la reconnaissance primaire. Cette reconnaissance a pour but d'évaluer la convenance générale du site, de le comparer avec d'autres sites et d'estimer les transformations qui peuvent être provoquées par les travaux. Elle permet également de planifier les reconnaissances destinées au dimensionnement et aux contrôles.

Ensuite commence l'étude géotechnique approfondie du terrain permettant de définir avec précision le type de fondation qui assurera la stabilité générale de l'ouvrage. Les essais en place ou « in situ » de la mécanique des sols les plus courants sont les essais réalisés au pénétromètre (statique ou dynamique y compris l'essai de pénétration au carottier dit SPT), les essais au pressiomètre et au scissomètre.

Compte tenu du nombre très élevé de concepts et d'informations utilisés en géotechnique, et que ce domaine n'est pas parfaitement maîtrisé par les experts et les chercheurs, nous avons jugé utile de concevoir un système expert(SE) qui permet d'analyser les résultats des essais géotechniques in situ. Le but est d'apporter une assistance aux ingénieurs afin qu'il puissent s'occuper encore plus des questions relevant de la réflexion et de la conception.

Dans le but d'essayer de concevoir un système expert pour l'analyse des résultats des essais géotechniques in situ, il a fallu d'abord passer par la phase d'acquisition qui consiste en un premier travail d'extraction par l'exploitation des connaissances documentées ; c'est-à-dire les ouvrages spécialisés du domaine, et l'interview d'un ou de plusieurs experts. La seconde phase débute par la représentation de la connaissance qui est le problème clé de l'intelligence artificielle.

Avant d'entamer la tâche de modélisation il faut bien définir le but à atteindre et le modèle de représentation qui semble adéquat. Pour cela nous avons préféré structurer notre base de connaissance avec des classes d'objets. Des règles de production ont aussi été prévues pour décrire les opérations sur ces objets.

Notre système expert a été conçu pour aider à estimer la portance du sol à partir des essais géotechniques in situ les plus utilisés en Algérie, particulièrement l'essai de pénétration statique. Il n'est dans son état actuel qu'un premier prototype qui nous a permis de valider les concepts et de démontrer sa faisabilité. Il reste ouvert à des éventuelles évolutions afin d'aboutir à un système plus complet qui pourrait être un outil opérationnel au service des ingénieurs et des experts.

Dans notre mémoire nous présentons la conception de ce SE d'aide à l'analyse des résultats des essais géotechniques in situ pour l'estimation de la portance.

Nous y exposerons :

- ❖ Une présentation théorique, sous forme de définition des systèmes experts et de leurs composants, leur mise en œuvre, leurs avantages et leurs inconvénients, les générateurs des SE, ainsi que les systèmes experts dans le domaine de la géotechnique.
- ❖ Un aperçu sur les étapes d'une reconnaissance primaire et sur quelques méthodes géophysique couramment utilisées.
- ❖ Une présentation des essais géotechniques in situ, leurs modes opératoires, le type de résultats qu'ils fournissent, et leurs limites d'application.
- ❖ La représentation de la connaissance des essais géotechniques in situ sous forme d'objets et classes d'objets, et la description de la base de règles concernant l'estimation de la capacité portante du sol à partir de l'essai de pénétration statique, qui est très utilisé en Algérie.

# CHAPITRE I

## CHAPITRE I

### ETUDE THEORIQUE DES SYSTEMES EXPERTS

**I-1-INTRODUCTION :**

Les experts humains sont capables d'effectuer un niveau élevé de raisonnement à cause de leur grande expérience et connaissance sur leurs domaines d'expertise. Un système expert utilise la connaissance correspondante à un domaine spécifique afin de fournir une performance comparable à l'expert humain. Les systèmes experts n'ont pas comme finalité de s'inspirer des théories du fonctionnement du cerveau humain mais ce sont des programmes qui utilisent des stratégies heuristiques pour la résolution des problèmes spécifiques.

Nous présentons dans ce chapitre une définition théorique des systèmes experts et de leurs composants, leurs mise en œuvre, leurs avantages et leurs inconvénients, et enfin les générateurs des systèmes experts (SE).

**I-2-ACQUISITION DE CONNAISSANCE :**

Dans son rôle, l'ingénieur de connaissance doit traduire l'expertise informelle en un langage formel adapté au mode du raisonnement du système. Plusieurs points doivent être soulevés concernant l'acquisition des connaissances : [1]

1. La compétence humaine n'est pas souvent accessible via la conscience. Avec l'expérience acquise, la compétence et la performance d'un expert s'installe et opère dans l'inconscient. Par conséquence, il est difficile aux experts d'explicitier son savoir-faire. [1]
2. L'expertise humaine prend souvent la forme du savoir comment plus que la forme du savoir quoi.
3. L'expertise change et peut subir des reformulations radicales.

A cause de la complexité et de l'ambiguïté posée par le problème de l'acquisition de connaissances, l'ingénieur de connaissances doit avoir un modèle conceptuel lui permettant de faire la liaison entre l'expertise humaine et le langage de programmation, ce modèle constituera ce qu'on appellera représentation de connaissances. [1]

**I-3-ETUDE THEORIQUE DES SYSTEMES EXPERTS :****I-3-1-Définition d'un Système Expert :**

Un système expert (SE) est un programme (logiciel) qui permet de modéliser un ensemble de connaissances, d'un ou de plusieurs experts, dans un domaine précis, sans être noyée dans un algorithme ; afin qu'un opérateur puisse les exploiter sans avoir à les assimiler (Il se contente d'entrer les informations à sa disposition, et le système expert lui donne la réponse). [2]

Il y a d'autres définitions qui considèrent un SE comme un logiciel intelligent qui peut jouer le rôle d'un expert. Mais cette définition n'est pas tout à fait juste car le SE doit rester en contact avec les experts et dialoguer en langage naturel avec eux pour faire évoluer ses connaissances. [2]

**I-3-2- Historique :**

Le premier système expert fut DENDRAL en 1965. Il permettait d'identifier les constituants chimiques d'un matériau, mais ses règles étaient mélangées au moteur. Le plus connu, peut-être, fut MYCIN en 1972-73, système expert de diagnostic de maladies du sang, conçu à l'université de Stanford par Shortliffe, avec un vrai moteur et une vraie base de règles. [3]

Aujourd'hui, les systèmes experts constituent une technologie bien définie faisant partie des systèmes à base de connaissances. [3]

### I-3-3-Développement et amélioration des SE :

Pour développer un SE il faut d'abord consulter un ou plusieurs experts humains dans un domaine précis, recueillir leurs connaissances, et formaliser l'ensemble des règles qu'ils utilisent dans leurs expertises. Ces connaissances sont gérées par l'ensemble des méthodes et des techniques permettant de les percevoir, de les identifier, de les analyser, de les organiser, de les mémoriser, Une fois qu'un premier ensemble de règles est établi, il ne reste plus qu'à les appliquer. [1]

La solution fournie par le système doit être évaluée par un expert humain et ceci dans le but de modifier l'information contenue dans la base de connaissances. Donc il est toujours possible de faire évoluer le SE par d'autres cognitivistes ou experts.(cf figure I-1) [4]

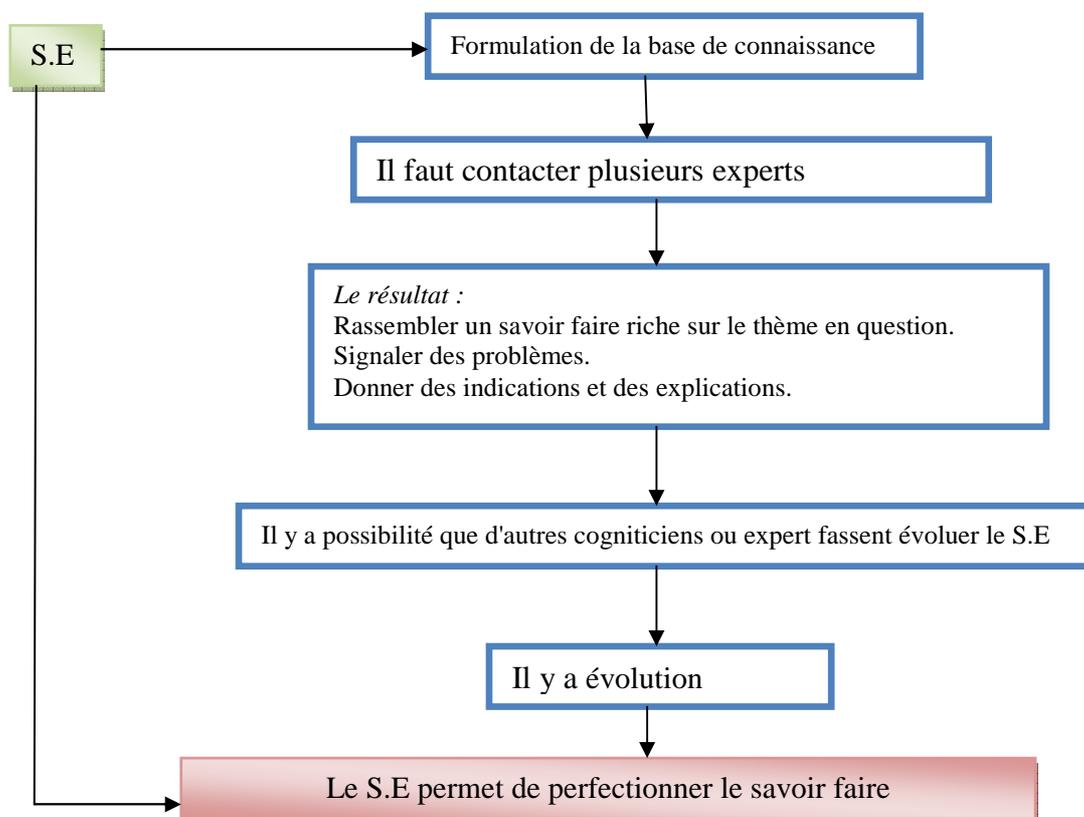


Figure I-1 : Processus de développement et d'amélioration du savoir faire grâce au SE[4]

### I-3-4- Caractéristiques d'un système expert :

Les systèmes experts doivent avoir les caractéristiques suivantes : [5]

- la séparation entre les connaissances déclaratives et la procédure d'inférence permettant de réutiliser les mêmes connaissances pour des tâches différentes ;
- comme la procédure d'inférence reste fixe, la construction d'un outil informatique se réduit à la formalisation des connaissances et serait donc très simplifiée ;
- la mise à jour d'un système existant serait de ce fait également facilitée de beaucoup ;
- les connaissances pourraient parfois avoir un caractère flou et heuristique ;
- le système pourrait profiter de techniques d'apprentissage pour améliorer ses performances.

**I-3-5-Rôle d'un système expert :**

Les systèmes experts sont d'abord des adjouvants à l'expert humain qui le déchargent des expertises simples et répétitives, et lui permettent de concentrer sa science sur les problèmes inédits et complexes. Comme ils servent aussi à Stocker l'expertise et la restituer à des non experts, ils facilitent la transmission du savoir et du savoir faire, ils permettent une standardisation des décisions. En permettant à plusieurs experts de participer à l'élaboration de la base de connaissance, le SE favorise la mise en commun du savoir faire de chacun et la mise au point de nouvelles connaissances résultant de leur synthèse. De plus il permet d'introduire de nouvelles connaissances à tout moment. Il donne donc la possibilité de faire évoluer et perfectionner la base de connaissances. [4], [6]

**I-3-6-Les principaux composants d'un système expert :**

En informatique classique, les données et les traitements sont intimement mêlés. En ce qui concerne les SE, la connaissance sera explicitée, selon un mode de représentation bien spécifique et un programme indépendant appelé moteur d'inférence. Cette technique présente un double avantage. D'une part, elle permet de modifier aisément la base de connaissance sans devoir retoucher le programme qui l'exploite .D'autre part, elle réduit considérablement le temps de développement d'une application. [6]

Le système expert, consiste en général en trois modules séparés interdépendants :

- une base de règles (appelée aussi base de connaissance BC) ;
- un moteur d'inférence MI;
- une interface de dialogue avec l'utilisateur.

Néanmoins, on peut distinguer un autre composant, à savoir la base de faits, qui constitue la mémoire du travail. [6]

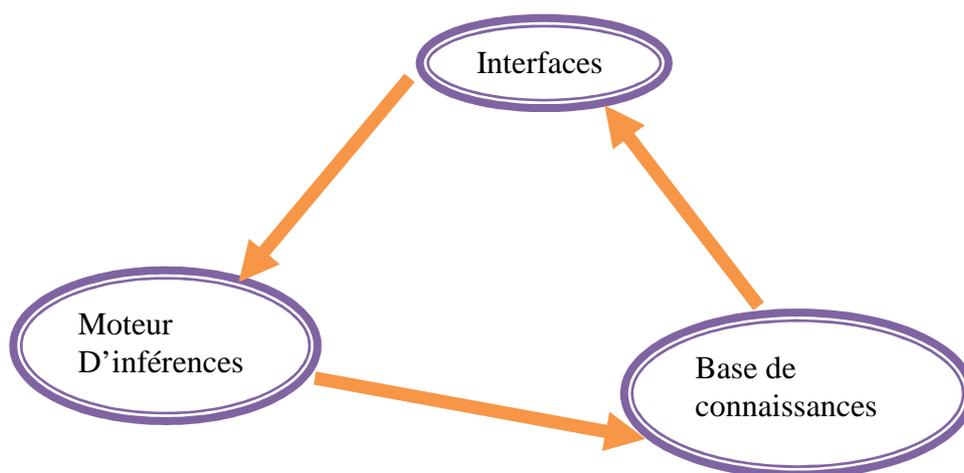


Figure I-2 : La représentation la plus simple d'un système expert [6]

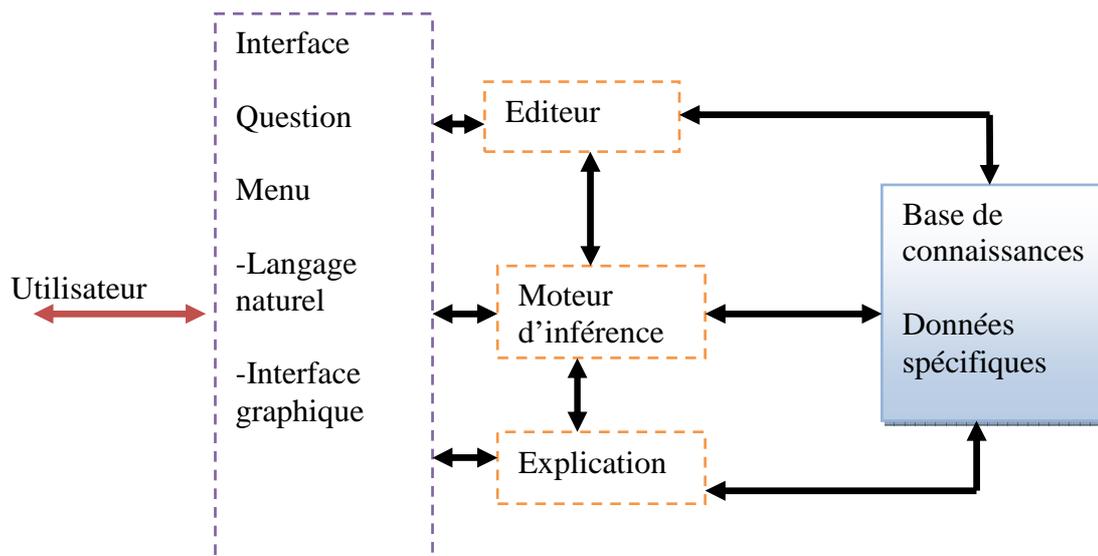


Figure I-3 : Structure d'un système expert [4]

### I-3-6-1- La base de connaissance BC :

La BC contient à la fois des données passives (les faits), et des données actives (les règles). L'ensemble des faits et règles constituent la connaissance dont on dispose sur un sujet donné. Donc la BC est structurée en deux sous ensembles : [1]

- Base des faits sous forme de connaissances assertionnelles.
- Base des règles ou connaissances opératoires.

- **La base des règles (BR)** (la base de connaissances opératoires) contient les connaissances du domaine mémorisées sous forme de règles de production, par des experts avec l'aide éventuelle de cognitiens, qui sont des spécialistes de la représentation des connaissances. [6]

Les règles sont intelligibles pour et par elles mêmes, et elles sont indépendantes les unes des autres (aucune règle de production ne fait appel à une autre règle).

Une **règle d'inférence** est de la forme : Si « prémisses » alors « conséquent ». La partie gauche exprime les conditions d'applicabilité de la règle. Elle peut contenir une conjonction de prédicats. La partie droite représente la conclusion, qui peut être une action à effectuer (un examen à faire) ou une assertion (prédicat) à ajouter à la base de faits. [7]

Une règle est applicable si la base de faits contient les informations pour valider ses prémisses. Le choix d'une règle se fait parmi les règles sélectionnées sur la base de certains critères, car plusieurs règles peuvent être en compétition lors du choix. Des **métarègles** peuvent être utilisées pour résoudre les conflits, c'est-à-dire aidé à choisir une règle à appliquer parmi plusieurs règles. [8]

- **La base de faits (BF)** contient les données spécifiques liées à l'application traitée. Elle peut contenir aussi les solutions intermédiaires ou les conclusions partielles trouvées lors de l'inférence. [8]

La base de connaissances peut aussi contenir un **méta -connaissance** c'est-à-dire un savoir faire en matière de gestion des connaissances ; autrement dit c'est la connaissance de la manière d'utiliser les connaissances. La méta-connaissance permet de faire évoluer de manière automatique la base de connaissances en fonction des nouveaux cas traités ou des nouvelles connaissances introduites. Il s'agit donc de connaissances sur une ou des connaissances. Elle permet d'utiliser intelligemment les connaissances factuelles et opératoires et de simuler le raisonnement. Elle exprime des stratégies qui évitent l'énumération exhaustive en indiquant la meilleure approche pour un but donné. Les métarègles forment un sous ensemble des Méta-connaissance. [6]

Il n'est pas toujours simple de décider quelles sont les connaissances qu'il faut mettre dans la base de faits et celles qui doivent être écrites sous forme de règles. La distinction entre les deux dépend bien souvent de la façon dont la situation est modélisée et du problème que l'on cherche à résoudre. [8]

### I-3-6-2- Le moteur d'inférence MI :

Le MI est le programme qui exploite la connaissance, pour ce faire, il nécessite la définition d'une stratégie de contrôle, il scrute à travers la BC et détermine comment les faits et règles doivent être gérés, il comprend des mécanismes de raisonnement et résout les problèmes en exploitant la BC en fonction de la situation courante fournie par BF. [10]

Le moteur d'inférence permet d'enchaîner et de contrôler les cycles d'application des règles, en partant des faits pour atteindre la solution du problème courant. Le cycle d'un moteur d'inférence est à trois temps :

- sélection des règles applicables,
- choix d'une règle
- et le déclenchement des règles. (cf figure I-4)

La première phase permet de se rapprocher de la solution du problème, le moteur détecte les règles intéressantes. La restriction permet une première sélection des règles. Le filtrage élimine les règles dont les conditions de déclenchement sont encore absentes et met dans un ensemble les règles utiles pour la résolution de conflits. [11]

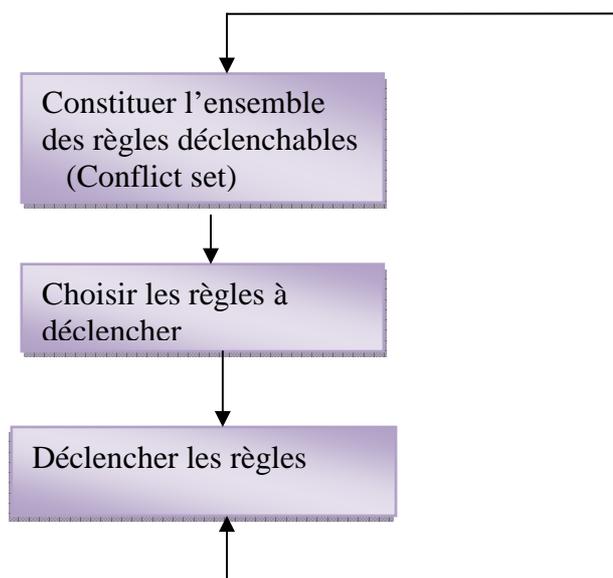


Figure I-4 : Schéma général de fonctionnement d'un moteur d'inférence [9]

La plupart des déductions logiques effectuées dans les systèmes basés sur la connaissance s'appuient sur le chaînage, qui peut être résumé sous trois formes :

- le chaînage avant,
- Le chaînage arrière,
- Le chaînage mixte.

En **chaînage avant** (raisonnement guidé par les données) : à partir des prémisses, appliquer les règles pour produire toutes les conséquences jusqu'au moment où une solution est trouvée. Le chaînage avant est la procédure naturelle d'inférence logique. Ce type de raisonnement est utilisé dans les cas où il y a nécessité d'une prise de décision rapide, dans ce cas on veut savoir ce qui va se passer si un nouveau fait est introduit [diagnostic, décision]. [9]

En **chaînage arrière** (raisonnement guidé par le but) : à partir de la solution, produire toutes les étapes intermédiaires hypothétiques (sous-buts) qui permettront de déduire une solution jusqu'au moment où un tel sous-but est satisfait par les prémisses. [10]

On part du but et l'on regarde les règles qui permettent de l'atteindre. Les règles sélectionnées sont celles dont la partie droite (conséquence) correspond au but recherché. Les conditions inconnues (partie gauche) de ces règles deviennent autant de sous-buts à démontrer. Ce processus est répété jusqu'à ce que tous les sous-buts soient démontrés- le but est alors atteint - ou jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de sélectionner des règles. Dans ce cas, le système peut demander à l'utilisateur de résoudre un ou plusieurs sous-buts (questions, tests) et le processus recommence. L'échec intervient quand le système ne peut plus sélectionner de règles ni poser de questions à l'utilisateur.

Le chaînage arrière procède en stratégie par tentatives. Le moteur d'inférence opère alors un retour arrière (backtracking) pour remettre en cause l'application d'une règle qui débouche sur un échec et pour essayer une règle écartée précédemment. Le chaînage arrière a été proposé comme une procédure qui est plus proche du raisonnement humain. [11]

Le **chaînage mixte** : est la combinaison des deux raisonnements avant et arrière. Il peut être utilisé dans tous les cas. Il est utilisé dans beaucoup de systèmes experts car il est compatible avec tous genres de problèmes. Il fonctionne comme suit :

- Tant que des règles sont déclenchables, on avance ;
- Puis on choisit une règle « presque déclenchable » et on essaie d'évaluer les prémisses inconnues en chaînage arrière ;
- En cas de succès, on repart en chaînage avant ;
- Le retour arrière en cas d'échec nécessite de restaurer le contexte.

### I-3-6-3- Interface :

C'est le module qui permet de faire communiquer les utilisateurs avec le système. On dit aussi que c'est l'ensemble des dispositifs et des outils mis à la disposition de l'utilisateur pour accéder à une application ou introduire des données. Pour la plupart des logiciels, l'interface utilisateur se présente sous forme d'une ligne de commande, d'interfaces graphiques (bouton, fenêtre de dialogue..) ou d'une interface à menu déroulant. A travers l'interface utilisateur il se produit un dialogue direct entre système et utilisateur. L'utilisateur consulte en premier le système, il introduit des faits et pose des questions. Le système réagit. Il déclenche le moteur d'inférence qui déclenche un raisonnement. Le système donne la solution à l'utilisateur ou bien demande d'autres données, l'utilisateur réagit de lui

même. On dit qu'il y a un dialogue continu entre le système et l'utilisateur. Ce dialogue doit être assuré dans une langue naturelle et non pas par des symboles. [11]

### **I-3-7-Système expert = automatisation de la logique :**

Pour raisonner, le moteur du système expert s'appuie sur la logique. Il y a plusieurs sortes de logiques : logique des propositions, des prédicats d'ordre 1 et plus, épistémique, modale, temporelle, floue, etc. Le moteur le plus simple s'appuie sur la "*logique des propositions d'ordre 0*".

#### **I-3-7-1-Logique classique :**

La logique classique est la logique formelle la plus utilisée aujourd'hui et ses premiers développements remontent aux travaux d'Aristote (Klir & Yuan, 1995). La logique classique est caractérisée par un ensemble de propriétés dont : [10]

- la propriété du tiers exclu,
- la propriété de non-contradiction
- la propriété de monotonie de l'implication.

#### **I-3-7-2-Logique floue :**

La logique floue généralise la logique classique avec des variables logiques et des formules logiques prenant des degrés de valeur de vérité quelconques entre 0 (faux) et 1 (vrai) inclusivement: 0 correspond à totalement faux, 1 correspond à totalement vrai, et les valeurs entre 0 et 1 exclusivement, ]0,1[, correspondent aux degrés de vérité floue entre totalement faux et totalement vrai.

La logique classique avec ses valeurs de vérité booléennes de 0 et 1 est considérée comme un cas particulier de la logique floue. [12]

### **I-3-8-Mise en œuvre d'un SE :**

La réalisation d'un système expert repose sur deux intervenants :

- 1- L'expert du domaine qui va restituer le savoir faire ;
- 2- Le cogniticien chargé de traduire le raisonnement de l'expert au sein d'un système expert.

Les rapports entre ces deux intervenants au cours du développement du S.E devront être fondés sur une bonne compréhension mutuelle, une confiance réciproque avec une absence de rétention du savoir faire ; le succès dans la réalisation d'un S.E dépend largement de la qualité de ces relations.

Pour la réalisation d'un Système expert il faut procéder à : [11]

#### **a/Evaluation du problème :**

Une fois l'identification du problème achevée il vient alors une étape plus importante qui est l'évaluation du problème. Dans cette phase le concepteur cherche à avoir une réponse satisfaisante aux questions suivantes :

- Le pourquoi et le comment ?
- Les bénéfices à en attendre !
- La possibilité d'extension à un système final.

Lorsque ces points sont clarifiés il faut définir les caractéristiques techniques de la solution et la nature du raisonnement à mettre en œuvre. [11]

**b/Elaboration d'un prototype :**

Jusqu'à ce stade l'équipe des ingénieurs de la connaissance et les experts ont pu élaborer un cahier des charges. Il reste à prouver la faisabilité du système : cela s'effectue par l'élaboration d'un prototype qui va traiter une partie du problème. Le prototype est structuré de telle sorte qu'il admette une extension au reste du problème. [11]

**c/Elaboration du système final :**

Tout d'abord le prototype permet de détecter toutes les erreurs et les insuffisances que présente le système. Si tous ces problèmes sont résolus on peut passer à un système final qui pourra être utilisé avec confiance. [11]

**I-3-9-Les générateurs d'un SE :**

Un générateur de système à base de connaissance est un système expert vide. Les spécialistes parlent aussi de Shell. Ce terme signifie coquille car le générateur est en fait une coquille vide qu'il faut remplir de connaissance. On peut aussi dire que c'est un outil de programmation qui offre une structure vide facilitant le développement d'un ou de plusieurs systèmes experts.

Un générateur de système expert offre aux développeurs une facilité dans l'implémentation ce qui donne un gain considérable dans le temps et une réduction remarquable dans le coût de développement du système. [15]

L'utilisation des générateurs est devenue de plus en plus commune. Il y a beaucoup de Shell disponibles pour toutes les classes d'ordinateurs. Quelques générateurs de système expert commun sont brièvement décrits ci-dessous : [15]

**a)-ART(Automated Reasoning Tool ) Créé par Inference Corporation.**

Ce générateur fournit une collection intégrée de logiciels permettant la création de systèmes à base de connaissances. Il fonctionne avec des règles de production et admet une programmation fonctionnelle en LISP. La représentation de la connaissance se fait avec des frames et le moteur d'inférence fonctionne en chaînage avant et arrière. [11]

**b)-KEE(Knowledge engineering environment ) créé par IntellCorp.**

Ce générateur soutient une variété de mode de représentation de la connaissance comprenant une représentation orienté-objet avec frame à héritage multiple et un interface à plusieurs fenêtres. Il permet aussi d'écrire des règles de production en orienté-objet. Le moteur d'inférence fonctionne en chaînage avant et arrière. [11]

**c)- Netica .**

Netica est un programme souple, rapide, facile à utiliser que vous pouvez employer pour trouver des modèles dans les données, pour créer des diagrammes codant la connaissance ou représentant des problèmes de décision, pour employer ces derniers afin de répondre à des questions et pour trouver

des décisions optimales, et créer des systèmes experts probabilistes. Il convient aux applications dans les secteurs du diagnostic, de la prévision, de l'analyse de décision, de la fusion de sonde, du bâtiment, de l'analyse de fiabilité, de modèles probabilistes, de la gestion des risques, et de certains genres d'exploitation d'analyse statistique et de données. [11]

#### d) Présentation de KAPPA-PC :

Notre système expert a été développé avec le générateur de système expert KAPPA-PC version 2.4. KAPPA-PC est un générateur de systèmes à base de connaissances commercialisé par IntelliCorp. Il permet d'écrire des applications dans un environnement graphique à un niveau élevé.

Dans KAPPA-PC 2.4 la représentation de la connaissance se fait par :

- ✓ Des règles de productions avec variables.
- ✓ Représentation orientée objet avec héritage simple.



KAPPA-PC 2.4 permet aussi d'écrire des fonctions suivant un langage dénommé KAL.

Dans le système de KAPPA-PC, les composants d'une application sont représentés par une structure d'objets à héritage simple. Les objets peuvent être des classes ou des sous classes. Ils peuvent représenter des choses concrètes comme des Fondations superficielles, des fondations profondes, des couches ou des concepts tels que la propriété d'un sol, l'état d'une couche etc. [13]

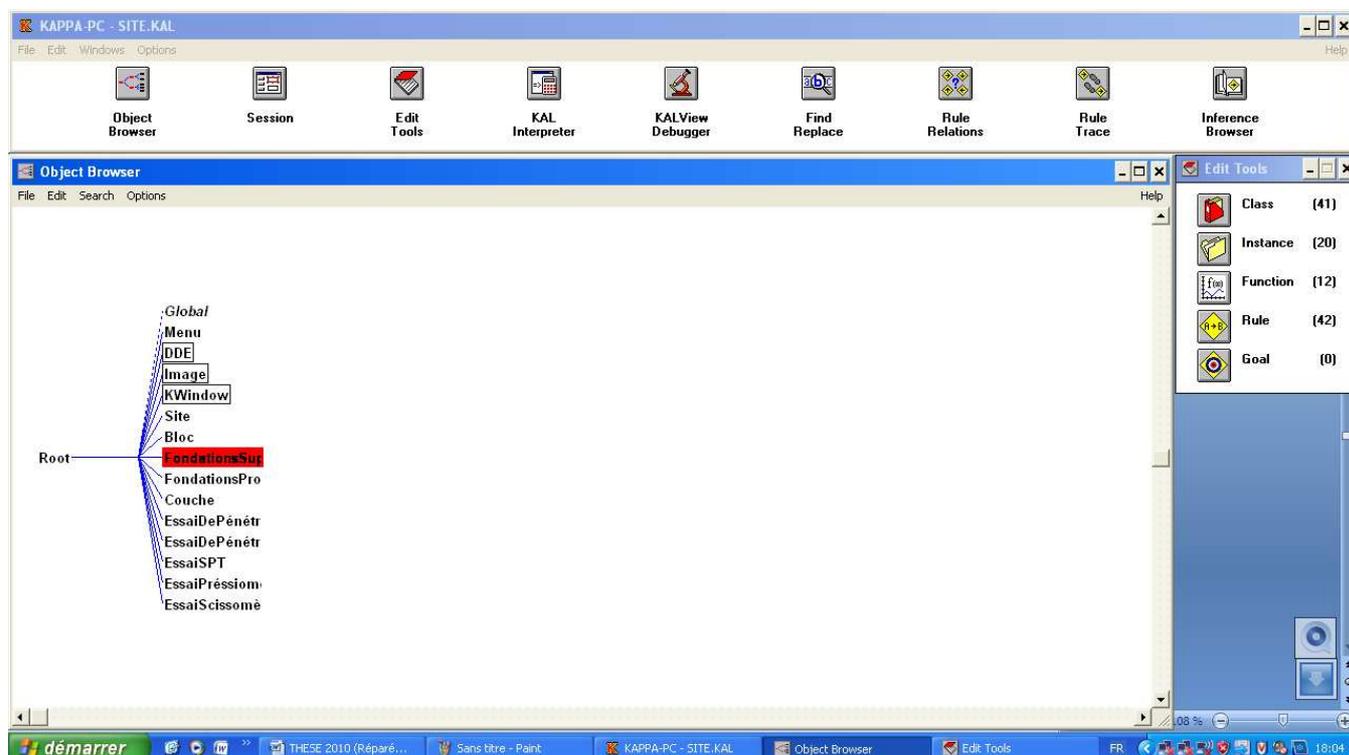


Figure I-5 : L'écran de KAPPA-PC version 2.4

Une application écrite avec KAPPA-PC nécessite ce qui suit :

- Structuration et construction de la base d'objets.
- Ecrire des méthodes et fonctions en KAL.
- Ecrire les règles de production.
- Paramétrer le moteur d'inférence.
- Développer l'interface utilisateur.

Les relations entre objets dans un modèle peuvent être représentées dans un ensemble appelé graphe d'héritage ou arbre.

Le générateur de système expert KAPPA-PC se compose principalement d'une base de connaissances vide, d'un moteur d'inférence et d'interface.

### **I-3-10-Avantages et inconvénients des SE :**

L'avantage essentiel de cette forme de logiciel c'est qu'il est capable de digérer des connaissances considérables et de les exploiter exactement comme un expert le ferait, en menant un dialogue pertinent avec ses utilisateurs. Ce dialogue s'appelle du Conversationnel. Aucune autre forme de logiciel à ce jour n'est capable d'offrir un tel service. Les débouchés naturels des systèmes experts sont : [3]

- L'aide à la décision ;
- l'aide au diagnostic ;
- les logiciels conversationnels ;
- les logiciels en permanente évolution ;
- la conservation des connaissances pointues (Knowledge Management) ;
- le génie logiciel (puisque'ils permettent d'écrire des programmes fiables sous une forme lisible de tous).

Le défaut du système expert, c'est que la quasi-totalité des développeurs ne connaît ni la méthode permettant de transformer la connaissance d'un expert en une base de règles ,ni le moteur permettant d'exploiter cette base. Bien que tous les deux existent depuis 1986, cette opération est réservée au cognicien, c'est à dire un informaticien de haut niveau qui, faute de méthode appropriée, transforme la forme simple du départ (base de règles + moteur) en un assemblage complexe très difficile à faire évoluer et qu'il est le seul à comprendre. Il en résulte que : [3]

- L'utilisateur ne peut pas participer au développement direct du système.
- Il y a difficulté de concevoir une règle particulière.
- Il y a une communication unique via la base de faits.

Par ailleurs lors de l'exécution, les systèmes experts se distinguent souvent par la lenteur par rapport à un programme classique. [3]

**I-4-LES SYSTEMES EXPERTS ET LA GEOTECHNIQUE****I-4-1- Spécificités du domaine géotechnique :****I-4-1- 1-Hétérogénéités.****a/Technique.**

La géotechnique est en effet le point de rencontre de spécialités distinctes : géologie, mécanique des milieux continus et discontinus, chimie, hydraulique, ... Chacune de ces spécialités implique une conception a priori des éléments géotechniques, une terminologie et des pratiques particulières. [14]

**b/Régionale.**

Un deuxième élément fonde l'hétérogénéité de la géotechnique, à savoir sa disparité régionale ; les types de roches et les configurations de sol sont liés à des régions, ce qui donne donc naissance à des terminologies et des concepts régionaux. [14]

**I-4-1- 2-Difficulté pour avoir la connaissance.**

Un sol est un système complexe dont l'étendue physique elle-même est soumise à des hypothèses. Le sol, défie l'observation ; on ne peut en connaître les caractéristiques qu'au travers de tests et de sondages qui ne permettent que l'approximation. [14]

**I-4-2-Comment envisager un système d'aide (une approche).**

Ces éléments de description permettent d'évaluer certaines des contraintes auxquelles un système d'aide pour la conception de projets géotechniques doit se soumettre. [14]

- Système utilisé et implémenté par les utilisateurs, spécialistes du domaine et peu accoutumés aux systèmes d'information.
- représentation des connaissances fondée sur des situations ;
- prise en compte des différentes hétérogénéités du domaine ;
- acceptation des approximations et données manquantes.

**I-4-3-Les systèmes experts géotechniques :**

Un des premiers SE en géotechnique était SITECHAR. Il s'agit d'un SE qui utilise le raisonnement géométrique pour mettre au point des conclusions sur les modes de dépôt des matériaux du sous-sol et de leurs propriétés physiques. [16]

Le système décrit par Stuckrath et Grivas (1990) axée sur la sélection des fondations du pont.

Un SE a été développé par Davey-Wilson (1991) pour analyser la résistance au cisaillement du sol.

Le SE créé par Kovalevsky & Kharchenko (1992), est utilisé pour la classification des sols basée sur une intégration des données géophysiques et géotechniques. [16]

SIGMA(1994), SE pour l'interprétation des conditions du sol à partir de puits de forage.

NOMAD (1994) qui peut être utilisé pour la caractérisation stratigraphique à trois dimensions. [16]

# CHAPITRE II

---

## RECONNAISSANCE PRIMAIRE ET ETUDE GÉOPHYSIQUE

**II-1- INTRODUCTION :**

La conception, la réalisation et la maintenance d'ouvrages de Génie Civile (Bâtiments, routes, ouvrages d'art, ouvrages souterrains etc.) et l'expertise d'un sinistre nécessitent une connaissance fine du sol, de sa nature, de son comportement. La reconnaissance primaire et l'étude géophysique, permettent de bien préciser le déroulement d'une investigation géotechnique et le choix de la technique la plus adéquate. [17]

**II-2- NORMES ET ESSAIS GEOTECHNIQUES EN ALGERIE :**

La normalisation des essais permettra d'unifier les procédures, l'information obtenue sera fiable et pourra circuler entre les différents intervenants. La norme indique soit des modes opératoires d'essais, soit des méthodes de calcul mais n'indique pas l'ouvrage le plus approprié et ne limite pas la responsabilité personnelle de l'exécutant d'un essai ou d'une étude dans une mesure ou dans une autre. [18]

Les pays développés disposent d'organismes chargés d'élaborer, de diffuser les normes et les documents techniques. On cite les organismes Américains **ASTM** et Français **AFNOR** créé en 1962. En Algérie, c'est l'institut Algérien de Normalisation **IANOR** créé en 1998 et qui dispose de 57 comités techniques nationaux « **CTN** ». Les normes Algériennes sont élaborées et publiées sur la base d'un plan annuel et pluriannuel de développement, elles font l'objet d'une révision obligatoire tous les cinq ans. [18]

Tableau II-1 : Normes Algériennes

**Catégorie 2 : Essais en place**

<b>1</b>	<b>Essai pressiométrique</b>	<b>NA 52006</b>
<b>2</b>	<b>Essai de pénétromètre statique</b>	<b>NA 2797</b>
<b>3</b>	<b>Essai de pénétromètre dynamique</b>	<b>NA 5205</b>
<b>4</b>	<b>Essai SPT</b>	<b>NA 5229</b>
<b>5</b>	<b>Essai de scissomètre de chantier</b>	<b>NA 5225</b>

**Autres Essais in situ**

<b>1</b>	<b>Essai de pompage</b>	<b>NA 5250</b>
<b>2</b>	<b>Essai d'eau LEFRANC</b>	<b>NA 5249</b>

En Génie Civile, les structures reposent sur le sol et si ce dernier est mal reconnu, le dimensionnement des infrastructures devient aléatoire. Pour que la reconnaissance soit fiable, il faut utiliser des procédures reconnues, c à d, normalisées.

**II-3- DEMARCHE DE L'ETUDE :**

Le prestataire doit d'abord connaître l'objet et les objectifs de projet ainsi que le périmètre de l'étude, après avoir analysé le site, souligner les avantages et les inconvénients éventuels, déterminer les conditions d'exécution de l'étude à mener (voir les conditions techniques et la protection du chantier comme la sécurité et l'hygiène). Il prévoit le déroulement de l'étude (programme d'investigation, estime le budget et apprécie la durée d'exécution).

Connaissant le projet et le site, le chargé d'études propose une offre technico-financière, après approbation de l'offre la loi Algérienne définit les relations contractuelles entre le prestataire et le maître de l'ouvrage, voir code des marchés publics.

Démarches et formalités administratives achevées, le prestataire relance l'étude géotechnique par tous les moyens possibles (examen visuel des lieux, analyse de la documentation existante, essais aux laboratoires...) A la fin de l'étude un rapport d'analyse géotechnique détaillé est remis au client.

#### **II-4-DEFINITIONS :**

Avant de passer aux étapes de l'étude géotechnique nous avons jugé utile de définir d'abord quelques notions liées au sol qui me semble incontournable pour éclaircir la suite de cet exposé.

##### **II-4-1-Définition du Sol :**

C'est une masse de particules discrètes résultant de la décomposition, de la désintégration de la roche et de matières organiques.

Un sol est décrit par : [19]

- La composition de ses grains solides.
- La composition de sa phase poreuse (liquide, gaz...)
- La granulation, la forme de grains et l'angularité des grains.

Remarques : Le terme sol ne fait aucune référence à l'arrangement des grains.

##### **II-4-2- Structure du sol :**

Le terme structure du sol fait référence à l'arrangement des grains et des groupes de grains ainsi qu'aux forces qui les relie. Une description complète de la structure du sol nécessite une observation à différentes échelles. [19]

- Une micro observation (petite échelle) comme les minéraux.
- Une macro observation (grande échelle) stratification, présence de surface de glissement, présence de cavité.

##### **II-4-3- L'Etat d'un sol :**

A tout instant l'Etat d'un sol est défini par l'indice des vides et les contraintes effectives. [19]

##### **II-4-4- Comportement d'un sol :**

Le comportement d'un sol peut être dilatant ou contractant par rapport à l'action des contraintes de cisaillements. [19]

- Un échantillon est dit contractant s'il tend à diminuer de volume lors de l'accroissement de la contrainte de cisaillement.
- Un échantillon est dit dilatant s'il tend à augmenter de volume lors de l'accroissement de la contrainte de cisaillement.

«A ne pas confondre avec les changements de volume induits par les variations hydrostatiques des contraintes effectives. »

## **II-5- LES ETAPES D'UNE RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE :**

Comme toute étude, l'investigation géotechnique, vu son importance, doit être planifiée en deux étapes bien déterminées qui se complètent utilement et il est toujours préférable de les associer lorsque cela est possible chacune apporte des éléments d'information concourant à une meilleure appréciation des caractéristiques du site. [20]

Deux étapes sont souvent indispensables dans une campagne d'exploration.

- A- Reconnaissance primaire
- B- Reconnaissance secondaire

## **II-6- METHODOLOGIE D'UNE ETUDE DE SOL :**

Le choix de la méthode dépend dans une large mesure de la nature du problème étudié et de la structure géologique du site.

Certains essais sont mieux adaptés que d'autres à l'étude d'un problème, compte tenu évidemment de la nature du terrain.

Comme on peut remarquer souvent, que sur un même chantier plusieurs types d'essais complémentaires sont utilisés afin d'avoir une bonne précision des paramètres étudiés. [21]

### **II-6-1- Reconnaissance Primaire :**

Cette reconnaissance a pour but d'évaluer la convenance générale du site, de le comparer avec d'autres sites et d'estimer les transformations qui peuvent être provoquées par les travaux. Elle permet également de planifier les reconnaissances destinées au dimensionnement et aux contrôles, d'identifier les zones d'emprunt. Il faut prendre en compte différents éléments en fonction de l'importance de l'ouvrage, la reconnaissance du terrain, la topographie, l'hydrologie, l'examen des ouvrages et des excavations voisines, les cartes et relevés géologiques et géotechniques, les reconnaissances antérieures, les photographies aériennes, la sismicité régionale etc. [21]

#### **II-6-1-1 - Moyens de la reconnaissance primaire :**

Les moyens de la reconnaissance primaires permettent de décrire le site sans quantification.

Parmi ces moyens on peut citer :

##### **II-6-1-1-1- Inspection visuelle du site :**

L'ingénieur doit toujours effectuer une inspection visuelle du site pour pouvoir se faire une meilleure idée sur sa nature.

- Examen de la végétation. Certaines végétations poussent dans un sol bien précis. Par exemple, le pin pousse dans les sols sablonneux, le hêtre dans l'argile et les céréales généralement dans le limon.
- Type de constructions avoisinantes et l'existence de problèmes comme les fissures dans les murs, tassements ou autres problèmes.
- La présence de roc ou d'affleurement rocheux dans les environs, peut indiquer la faible profondeur du socle rocheux.
- Type du climat où est situé le site (sècheresse, inondation, gel, dégel...)
- Le niveau de la nappe d'eau qui peut être déterminé en regardant au voisinage (puits existants...)

- Examen de la situation géographique. Cet examen peut fournir une idée générale des couches hétérogènes correspondantes à différentes époques de dépôt des matériaux alluvionnaires.

Une carrière peut être considérée comme une coupe dans le terrain où les couches peuvent être visualisées. [21]

#### **II-6-1-1-2- Recueil de la documentation existante :**

Peut-être défini comme une enquête documentaire sur le cadre géotechnique, géologique du site etc. Elle comporte une analyse des études déjà effectuées sur le site. Des informations d'archives existantes, qui peut aller jusqu'à une enquête orale visant à rencontrer les personnes informées sur les conditions du site (des fois voir même les citoyens).

Ces informations recueillies devront être critiquées et analysées par les géotechniciens et vont être considérées comme une première approche à l'étude. [21]

#### **II-6-1-1-3- Etude topographique :**

L'objectif de la topographie est la détermination de la position et de l'altitude de n'importe quel point situé dans une zone donnée. Les travaux de topographie sont menés par des géomètres, des topographes ou des géomètres experts.

Le géotechnicien tire de la carte topographique (ancienne et récente) la nature du terrain, des reliefs et la possible existence des fosses de drainage et l'existence de débris ou de matériaux quelconques. Les courbes de niveau donnent le relief du terrain, ce qui permet d'apprécier le potentiel des glissements de terrains. [21]

#### **II-6-1-1-4- Reconnaissance géologique :**

C'est l'identification du sol par observation visuelle des différentes couches, confinée par l'examen des cartes géologiques, elle permet une description du site et son environnement :

- Nature des roches et leurs minéraux constituant (roches magmatiques, roches sédimentaires, roches métamorphiques).
- Nature des sols, âge et genèse de leurs formations (tourbes, vases, limons...)
- Une indication sur la granulométrie, la porosité, et la perméabilité des sols
- Stratigraphie des sols...

Donc la connaissance préalable du contexte géologique est indispensable, car elle permet d'orienter l'examen du site vers la recherche de certains types d'indices, en utilisant l'expérience antérieure de contextes semblables. L'aboutissement de cette première reconnaissance du terrain est l'établissement d'un diagnostic préliminaire sur l'opportunité d'engager des études plus poussées. [21]

#### **II-6-1-1-5- Photographie aérienne :**

L'interprétation de photographies aériennes (en couples stéréoscopiques) peut utilement compléter la cartographie classique (carte topographique, carte géologique...) et même la remplacer dans certains cas (absence de fond topographique utilisable). Son utilité réside notamment dans la possibilité qu'elle offre de mettre en évidence des structures non directement observables sur le terrain, grâce à l'intégration de multiples détails que permet le recul de la prise de vue aérienne et parfois des traits géomorphologiques de grande ampleur difficilement visibles au sol ou masqués (végétation).

L'examen des photographies aériennes (les plus récentes possibles), fournit aussi des indications sur le couvert végétal et l'occupation des sols. [21]

#### **II-6-1-1-6- La sismicité régionale :**

Le problème de la protection antisismique revêt deux aspects :

- D'abord, en un site donné, la prévision des amplitudes qui sont susceptibles d'y prendre les manifestations sismiques et probabilités qu'elles ont de s'y produire avec une intensité donnée, c'est essentiellement l'affaire des sismologues. [22]
- Ensuite la réalisation d'ouvrages capables de montrer un comportement satisfaisant pour l'intensité contre laquelle il a été décidé de se protéger. C'est la tâche de l'ingénieur. [22]

#### **II-6-1-1-7- Reconnaissance hydrogéologique :**

La présence de l'eau dans le sol est d'une grande importance parce qu'elle pose toujours de délicats problèmes à l'ingénieur appelé à construire en profondeur.

L'eau peut modifier considérablement les propriétés mécaniques de certains sols, peut aussi y créer une pression interstitielle ou une pression de courant et par là, peut modifier la stabilité d'un versant ou d'une assise d'ouvrage. [23]

L'hydrogéologie représente donc un aspect particulier et complémentaire de l'étude géologique d'une région, elle propose l'importance et la position des réserves d'eau qu'elles soient de surface ou souterraine. [23]

### **II-7- ETUDE GEOPHYSIQUE :**

La reconnaissance géophysique, ou prospection géophysique, met en œuvre un ensemble de méthodes où l'on cherche à partir d'une ou plusieurs propriétés physiques à déterminer les propriétés du milieu souterrain de manière non destructive (non-invasive) et avec un échantillonnage spatial suffisamment dense pour que les variations latérales et verticales en soient décrites aussi complètement que le permettent la propriété et la méthode de mesure utilisée.

Les mesures peuvent être réalisées à partir de la surface, de puits ou d'excavations préexistantes.

Le plus souvent elles ne permettent pas, à elles seules, de déterminer les valeurs des paramètres géotechniques mais sont indispensables pour placer judicieusement les forages où seront effectuées les mesures de ces paramètres. [24]

La présente étude n'a pas pour but de présenter de façon exhaustive les différentes méthodes géophysiques, mais de présenter un petit résumé des méthodes géophysiques les plus couramment utilisées. [24]

#### **II-7-1- Choix de la méthode de mesure :**

Le choix d'une méthode géophysique et du programme technique, doit être établi après examen du problème posé, des données géologiques et des conditions d'environnement. Ce choix conduit à retenir le ou les paramètres physiques susceptibles de présenter un contraste suffisant pour répondre à l'objectif. [25]

Donc le premier choix du prospecteur reste dirigé par la propriété à mesurer, en fonction des caractéristiques recherchées du terrain, la facilité d'emploi et les sensibilités des appareils disponibles

interviennent ensuite dans le choix de la méthode de mesure et de l'appareillage. Le coût de la mise en œuvre d'une méthode reste toujours un élément déterminant dans les choix. [25]

### II-7-2- Les principales méthodes géophysiques :

Les méthodes de reconnaissance géophysiques permettent de déterminer la nature des couches profondes en utilisant par exemple leurs caractéristiques : [26]

- ✓ Magnétiques
- ✓ Prospection électrique
- ✓ Prospection sismique
- ✓ Prospection gravimétrique

Tableau II-2 : différentes méthodes géophysiques. [26]

Méthodes	Dérivées
<b>Gravimétrie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gravimétrie</li> <li>• Micro-gravimétrie</li> <li>• Diagraphie différée</li> </ul>
<b>Sismique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sismique réfraction</li> <li>• Sismique réflexion</li> <li>• Tomographie sismique</li> <li>• Cross-hole</li> <li>• Diagraphie sonique et micro-sismique</li> </ul>
<b>Electrique par courant injecté</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prospection électrique</li> <li>• Méthodes électromagnétiques en basse fréquences</li> </ul>
<b>Magnétique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Magnéto-stratigraphie</li> </ul>
<b>Electromagnétique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radar géologique</li> <li>• Tomographie électromagnétique</li> </ul>
<b>Radioactivité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagraphies de radioactivité naturelle</li> <li>• Diagraphie neutron-<math>\gamma</math></li> <li>• Diagraphie neutron- neutron</li> </ul>

### II -7-3- La méthode sismique :

Le principe de la prospection sismique est lié au fait que si en un point du sol on provoque un ébranlement, il se propage de proche en proche en s'amortissant ; le temps nécessaire pour qu'il atteigne des récepteurs dépend de la nature et de la disposition des formations géologiques. La prospection sismique a pour base l'étude de ce temps de propagation. [25]

On suppose que les ondes se propagent en ligne droite dans une couche et ne changent de direction qu'au passage dans une autre couche suivant le principe de la réflexion et de la réfraction. [27]

La mise en œuvre des méthodes sismiques peut concerner des mesures en surface ou avec un forage préexistant. L'équipement comprend :

- un émetteur d'ondes (la plupart du temps l'ébranlement est créé par une petite charge d'explosif ou par un camion vibreur) ; [27]
- un récepteur (sismographe ou géophone) associé à un enregistreur mesurant le temps de parcours. [27]



Figure II-1 : Emetteur d'onde (camion vibreur)



Figure II-2 : Récepteurs d'ondes (géophones)

#### II-7-4- La méthode électrique :

C'est une méthode dynamique qui consiste à mesurer la résistivité du sol qui varie suivant la composition de ses minéraux et l'importance et la nature de l'eau. Deux électrodes impolarisables envoient dans le sol un courant ; on mesure alors la différence de potentiel entre deux joints intermédiaires. [28] , [29]



Figure II-3 : Résistivimètre

### II-7-5- Prospection gravimétrique :

Si la terre était homogène, parfaitement sphérique et, de plus, immobile dans un espace complètement vide,  $g$  (l'accélération de la pesanteur) serait la même sur toute sa surface. Or, en fait,  $g$  varie de façon très appréciable d'un point à un autre du globe terrestre. [25]

La prospection gravimétrique consiste à mesurer les variations de l'accélération de la pesanteur puis à appliquer aux valeurs brutes un certain nombre de corrections pour éliminer l'influence des autres corps célestes, de la rotation et de la forme de la terre, afin de ne faire ressortir que les anomalies imputables seulement aux variations de densité du sous-sol. [25]

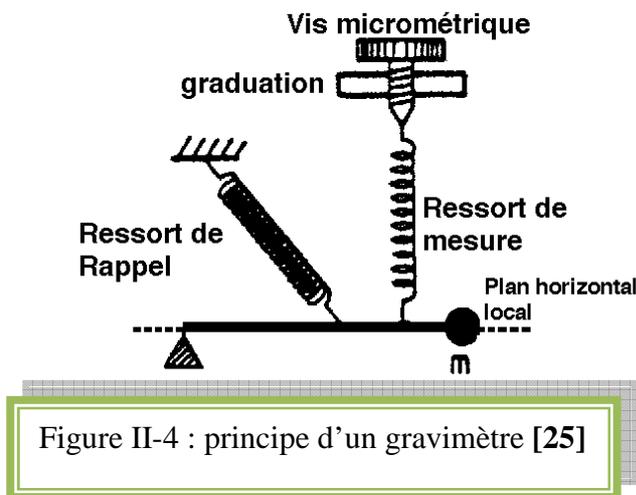


Figure II-4 : principe d'un gravimètre [25]

### II-7-6- Méthodes électromagnétiques :

On développe aujourd'hui des méthodes électro magnétiques toujours plus perfectionnées dans le but de s'affranchir de la contrainte des électrodes plantées dans le sol. Le principe consiste à mesurer la déformation de champs électromagnétiques provoqués artificiellement. L'interprétation de cette déformation peut permettre d'identifier la nature des couches sous-jacentes ainsi que la profondeur de celles-ci. [30]

### II-7-7- Méthodes magnétiques :

Certaines roches ont une susceptibilité magnétique importante, et qui dépend dans une très large mesure de leur teneur en minéraux ferromagnétiques et principalement en magnétite et ilménite. La prospection magnétique au sol a pour objet de mesurer les variations de la composante verticale du champ magnétique ou du champ total sur un secteur donné ou le long d'un profil donné. Cette méthode peut parfois constituer une approche de départ pour préciser par exemple la position d'un filon ou d'une discontinuité sur un site avant de lancer des approches plus coûteuses et complexes. La mise en œuvre de la méthode magnétique au sol ne nécessite un opérateur expérimenté, disposant d'un magnétomètre portable et d'un magnétomètre en station fixe pour l'obtention d'un profil ou d'une carte dont une interprétation sommaire qualitative, de base, est relativement facilement accessible. Pour une interprétation quantitative, la méthode nécessite un géophysicien averti. [30]

**II-7-8- Conclusion :**

Les résultats de ces essais ne donnent jamais une idée très précise du terrain, mais donnent des indications précieuses sur l'emplacement des zones dangereuses où il conviendra d'implanter les sondages. [30]

L'utilisation des méthodes géophysiques est résumée dans le tableau II-3.

Tableau II-3 : récapitulatif de l'utilisation des méthodes géophysiques [30]

Méthode	Principe de mesure	Objectifs	Avantages	Inconvénients
<b>Sismique réfraction</b>	vitesse des ondes de compression directe et réfractée	-caractérisation des vitesses des terrains -profondeur du substratum -recherche du toit de la nappe	porte directement sur une propriété utilisable en mécanique	-la vitesse doit être croissante avec la profondeur -suppose un milieu quasi-tabulaire -l'ente -mauvaise résolution horizontale -mise en œuvre délicate en ville
<b>Sismique réflexion</b>	temps d'arrivée des ondes élastiques sur toute interface	-structure géologique profonde -caractérisation des terrains par mise en évidence des horizons réflecteurs -vitesse et impédances acoustique	porte directement sur une propriété utilisable en mécanique	-mise en œuvre très lourde -utilisable pour des profondeurs $\geq 20m$ -utilisation exceptionnelle en Génie Civil
<b>(micro)Gravimétrie</b>	variations locales du champ de pesanteur	recherche des vides des zones décomprimées, du toit du substratum	porte sur la densité	-mesures lentes -mesures d'altitudes très précises nécessitent des corrections
<b>prospection électrique par courant injecté</b>	résistivité	structure du terrain	-la résistivité présente une grande gamme de variations -maîtrise de la résolution latérale et verticale -rapide (faibles couts)	-nécessité d'un contact électrique avec le sol d'où difficultés en milieu urbain
<b>Radar-Sol</b>	réflexion des ondes E.M. sur les contrastes de permittivité	structure du terrain identification d'obstacles	très grande résolution géométrique de la structure du terrain	-profondeur d'investigation limitée par la présence d'argile

# CHAPITRE III

---

## ESSAIS GEOTECHNIQUES IN SITU

### III-1- INTRODUCTION :

Dans la reconnaissance des sols destinés à recevoir des projets de construction, les essais géotechniques in situ ou en laboratoire permettent d'obtenir des informations sur l'état du sol, de préciser l'organisation des différentes couches et de dériver les paramètres mécaniques à leur attribuer afin de passer au calcul des ouvrages. [31], [32]

### III-2- LE SONDAGE :

#### III-2-1-Introduction :

Parmi les méthodes de reconnaissance géologique et géotechnique, les sondages tiennent une place importante du fait des renseignements qu'ils peuvent fournir par eux-mêmes, ou grâce à l'adjonction de système complémentaire d'information. [33]

Bien qu'étant une technique très ancienne, le forage s'est beaucoup développé avec les recherches minières et pétrolières, et il a mis à profit de nombreuses innovations techniques déterminantes comme l'utilisation de matériaux très durs, d'aciers spéciaux, l'air comprimé et la transmission hydraulique. On tend à appeler forage, l'exécution d'un trou sans souci particulier de récupération d'échantillon, mais pouvant servir de base à d'autres opérations. Et sondage, l'exécution d'un trou échantillonné ou l'application de méthodes de mesure dans le forage. Le sondage permet de retrouver et de situer avec précision les différentes couches traversées, de détecter les hétérogénéités à l'intérieur d'une même couche, et de localiser les cavités ou les blocs. [33]

#### III-2-2 Types de sondages :

Il existe aussi bien des sondages destructifs par battage "Pénétromètre" ou rotation..., que des sondages non destructifs par prélèvement continu de carottes par rotation ou vibropercussion.

##### III-2-2-1-Sondages destructifs :

Cette méthode très employée consiste à prélever des échantillons remaniés soit à la pelle mécanique soit à l'aide d'outils à main, en revanche la profondeur ne peut excéder 10 m. On emploie aussi des sondeuses à moteur ou des tarières hélicoïdales continues. [34]

Les principaux facteurs de remaniement de l'échantillon sont :

- modification de l'état de contraintes initiale dans le sol,
- Perturbation de la structure et décomposition des éléments de l'échantillon,
- changement chimique des matériaux.

Parmi les méthodes de sondage destructif on peut énumérer :

- Les reconnaissances par puits, tranchées et galeries,
- Sondage destructif à la tarière,
- Sondage à la pelle mécanique,
- Sondage mécanique.

**III-2-2-2-Sondage carotté :**

Le sondage carotté consiste à descendre un carottier par rotation, battage ou pression suivant le type de sols jusqu'à une profondeur donnée. Le carottier est constitué d'un ensemble de tubes creux et d'un outil d'attaque souvent diamantée ou en carbure de tungstène à son extrémité afin de découper le terrain. On remonte ainsi des échantillons intacts (carotte). Ces carottes sont mises en caisse avant d'être examinées par l'ingénieur qui pourra ainsi réaliser une coupe précise du sous-sol. Le carottier peut être manuel ou motorisé ; (cf figure III-1) et (cf figure III-2). [35]



Figure III-1 : Carottiers motorisés pour le sondage et l'échantillonnage de sols.



Figure III-2 : Carottiers manuels pour l'échantillonnage non remanié de sédiments en bassin.

La pénétration par rotation est recommandée pour les sols rocheux durs. On utilise la percussion (ou battage) du carottier dans le cas des sols pulvérulent ou cohérents compacts. Dans le cas d'un sol meuble, il existe un grand nombre de carottiers. [35]

**III-2-3- Nombre et profondeur de sondage :**

Il n'y a pas de règles précises pour déterminer le nombre de points de sondages qu'il est assez difficile de prévoir à priori. Il faut que ces forages soient cependant assez nombreux pour définir sans ambiguïté toute les particularités géologiques d'un site. [36]

On peut prévoir Le nombre de forages approximatives à partir de :

- Nature de la structure ;
- Dimensions de la structure ;
- Coût de la structure
- hétérogénéité du sol.

Les profondeurs maximales de sondage varient beaucoup avec les terrains rencontrés, les techniques de sondage possibles, et selon les renseignements recherchés. Mais il faudra bien arrêter les forages à une profondeur fixée à l'avance ; étant entendu que d'une manière absolue, ils ne doivent jamais être arrêtés sur une couche molle. A cet égard, l'enquête géologique préalable est fondamentale. Lorsqu'il s'agit d'une étude de fondation, la profondeur de l'investigation sera fonction de la nature et de la dimension présumée des fondations. [36]

### III-3-ESSAI DE PENETRATION STATIQUE CPT :

#### III-3-1-Historique :

L'essai de pénétration statique bien connu dans le monde du génie civil, son origine peut remonter aux U.S.A., mais c'est surtout aux Pays-Bas à partir de 1932 qu'il s'est le plus rapidement développé, grâce aux activités du Laboratoire de Mécanique des Sols de Delft. [36]

#### III-3-2-Le pénétromètre statique :

C'est un appareil plus précis et plus fidèle. Il mesure au cours de la pénétration en profondeur d'une barre terminée par un cône l'effort de pointe correspondant à la résistance du sol au poinçonnement et l'effort de frottement latéral. Ces deux caractéristiques permettent de déterminer la force portante du sol à différentes profondeurs et de bien choisir le mode de fondation. [37]

#### III-3-3-Pénétrromètres à cône mobile :



Figure III-3 : Pénétrromètre Gouda 200 KN porté sur camion

Dans ces appareils la pointe n'est pas solidaire du fut extérieur, ce qui permet de mesurer séparément l'effort en pointe et le frottement latéral, ainsi que l'effort total. Parmi ces appareils on trouve :

- Les pénétromètres hollandais offrent une gamme qui va du simple pénétromètre à main, jusqu'au pénétromètre lourd de 200 KN (le pénétromètre Gouda de 100 KN, et celui de 200 KN sont les plus utilisés en Algérie pour cette raison la suite de notre étude se basera sur ces deux pénétromètre).
- Le pénétromètre Meurisse qui présente l'avantage de pouvoir fonctionner en pénétration dynamique en présence d'une couche résistante pour laquelle  $q_a = 5\text{MPa}$ .
- Le pénétromètre sol étanche ; et d'autres....

### III-3-4-Pénétrromètres à cône fixe :

Dans ces appareils, la pointe reste solidaire du fut, ce qui implique la seule mesure de l'effort total qui englobe l'effort de pointe et le frottement latéral.

Parmi ces appareils on trouve :

- Le pénétromètre de Laboratoire des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc qui représente une adaptation de pénétromètre Hollandais.
- Le pénétromètre Fugro, c'est un appareil très sophistiqué, et d'un très grand intérêt.
- Le pénétromètre C.E.B.T.P qui peut être également utilisé en pénétration dynamique.

Comme il existe aussi d'autres pénétromètres car nombreux sont les organismes d'étude qui ont réalisé leur propre appareillage. [31], [36]

### III-3-5-Appareillage :

Un pénétromètre statique comporte : [38]

- Une structure de réaction,
- Un vérin de fonçage à vitesse constante,
- Une pointe munie d'un cône fixe et, éventuellement d'un manchon de frottement et /ou d'un capteur de pression interstitielle,
- Des dispositifs de mesure de l'effort sur le cône, du frottement latéral local, de l'effort total et, éventuellement de pression interstitielle.

### III-3-6-Description du pénétromètre Gouda :

Ce sont des appareils fabriqués à Gouda par Goudsche Machinefabriek. Ce sont des pénétromètres à cône mobile à transmission par tiges ; la pointe conique fait un angle de  $60^\circ$  et à une section droite de  $10 \text{ cm}^2$ . Ces appareils comprennent 3 éléments fondamentaux : [38]

- Le dispositif de chargement, ancré au sol ou lesté et servant à transmettre les efforts.
- Le matériel de pénétration : tubes, tiges, cône.
- Le dispositif de mesure.

### III-3-7-Principe et réalisation de l'essai de pénétration statique :

Bien connu dans la mécanique des sols, l'essai CPT consiste à enfoncer dans le sol à vitesse lente et constante (généralement  $2 \text{ mm/s}$ ) un cône accompagné de son train de tige. Lors de cet essai sont mesurés tant le frottement latéral que la résistance à la pointe. Dans le cas de réalisation de l'essai à cône mobile les mesures sont discontinues, on est obligé d'arrêter la pénétration lorsqu'on voudra mesurer ; et l'essai se pratique de la manière suivante ; on enfonce la pointe seule sur  $4 \text{ cm}$  à une vitesse constante. On mesure ainsi la force totale de pointe. En poussant sur le tube, celui-ci rattrape la pointe qui vient buter contre lui. On mesure ensuite l'effort total qui est la somme du frottement latéral cumulé et de la réaction à la pointe. On recommence l'opération tous les  $20 \text{ cm}$ . Les mesures sont donc discontinues. [31]

Dans l'essai à cône fixe et à mesure continue, on effectue à intervalle déterminé, par exemple tous les  $20 \text{ cm}$ , une lecture de l'effort total et de l'effort en pointe. Dans le cas où l'appareil est muni d'un dispositif enregistreur on obtient directement, soit des lectures quasi continues, soit la courbe des

efforts en fonction de la profondeur. Si P est la réaction qu'oppose le sol à l'enfoncement du cône et B le diamètre de la base du cône on définit l'effort de pointe  $R_p$  par la relation : [36]

$$R_p = \frac{4P}{\pi B^2}$$

### III-3-8-Calcul de la portance d'une fondation superficielle :

#### ➤ EN TERRAINS PULVERULENTS :

Meyerhof a proposé une formule expérimentale très simple :

$$q_a = (R_p \cdot B/36) \cdot (1 + D/B) [31]$$

Qui est également présentée sous forme d'abaques.

$q_a$ : Contrainte admissible.

#### ➤ EN TERRAINS COHERENTS SATURES ( $\varphi_u = 0$ ; $C_u$ ) :

- Semelle filante : la contrainte admissible  $q_a$  pour une semelle filante assise à la profondeur D est donnée par la relation :

$$q_a = [(\pi + 2) / 3] C_u + \gamma D \quad (\text{avec } F=3). [31]$$

- Semelle isolée : il convient de multiplier la valeur de  $q_a$  de la semelle filante par le coefficient 1,3.

### III-3-9- Calcul de la portance d'une fondation profonde :

Le pénétromètre statique est un pieu de petites dimension d'où l'idée de calculer la résistance de pointe et le frottement latéral d'un pieu à partir des caractéristiques mesurées au moyen d'un essai pénétrométrique. [31]

#### III-3-9- 1-Calcul de contrainte limite de pointe $q_p$ d'un pieu à partir de $R_p$ :

##### ➤ REPRESENTATIVITE DE LA VALEUR $R_p$ A PRENDRE EN COMPTE :

En supposant que  $D \geq D_c$ , il existe deux méthodes de calcul :

\*Méthode de Begemann : [31]

$$R_p = (1/2) (R_{p1} + R_{p2}).$$

$R_{p1}$  : valeur moyenne de  $R_p$  sur la hauteur  $h_1$  au dessus de la pointe de pénétromètre.

$R_{p2}$  : valeur moyenne de  $R_p$  sur la hauteur  $h_2$  au dessous de la pointe de pénétromètre.

Sur La base de plusieurs essais, Begemann propose d'adopter :

Pour les sols pulvérulents :

$$h_1 = 6B \quad \text{et} \quad h_2 = 3,5B ;$$

Pour les sols cohérents :

$$h_1 = h_2 = B.$$

(cf figure III-4)

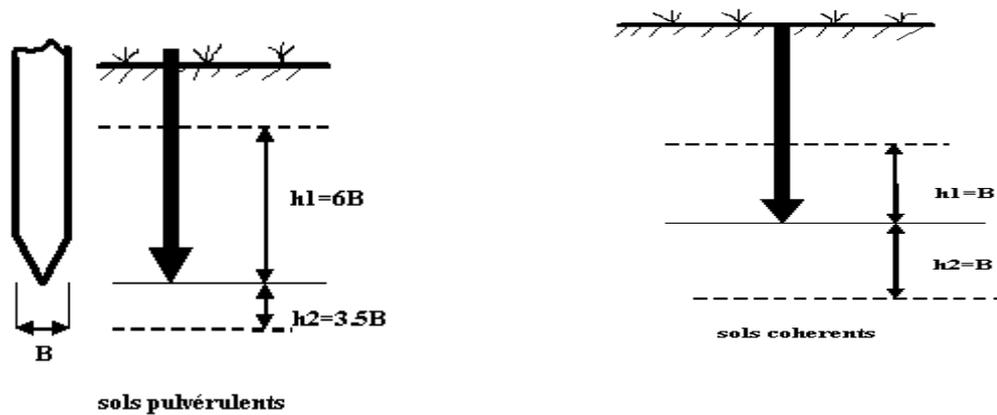


Figure III-4 : Détermination de la résistance de pointe par la méthode de Begemann [31]

\*Méthode de Van der Ween : [31]

$$R_p = (1/4,5B) \cdot \int_{-B}^{+3,5B} R_p(z) dz .$$

Dans la pratique on remplace, on remplace l'intégral par une dizaine de valeurs de  $R_p$  répartie sur la hauteur 4,5B au voisinage de la pointe. (cf figure III-5)

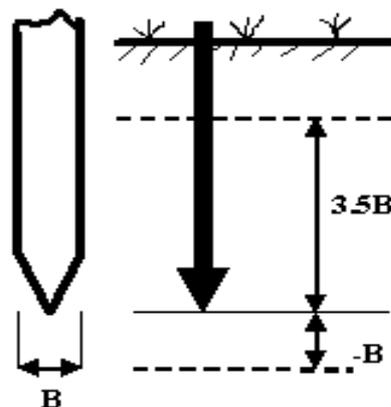


Figure III-5 : Détermination de la résistance de pointe par la méthode de Van der Ween. [31]

➤ INFLUENCE DE LA NATURE DES TERRAINS :

On prend :

$$q_p = K R_p.$$

K est un coefficient réducteur dont la valeur dépend de la nature de terrain.  
(cf tableau III-1) [31]

Tableau III-1 : les valeurs de coefficient K selon la nature de terrain [31]

K	TERRAINS
1	Argiles et marnes
0,9	Argiles sableuses, limons, silts, sables lâches
0,3	Sables de compacité moyenne
0,7	Sables compacts

➤ EFFET D'ECHELLE :

Pour tenir compte de l'effet d'échelle, les hollandais adopte la relation  
Suivante :

$$q_p = (b/B) R_p. [31]$$

b et B étant respectivement le diamètre de la pointe de pénétromètre et celui de la base de pieu. [31]

### III-3-9- 2- Calcul de frottement latéral unitaire limite f sur le fut d'un pieu :

Ce calcul peut être fait soit à partir du frottement mesuré sur le fut du pénétromètre, soit à partir de la résistance de pointe  $R_p$ . [31]

➤ ESTIMATION DE f (pieu) A PARTIR DE f (pénétromètre) :

On peut dire que selon la technologie de mise en œuvre de pieu f (pieu) peut osciller entre 1/4 et 2f (pénétromètre). [31]

➤ ESTIMATION DE f (pieu) A PARTIR DE LA VALEUR DE  $R_p$  :

Voici ci après les fourchettes couramment proposer en fonction de la nature du terrain :

- argiles molles ; tourbes :  $R_p/25 < f \text{ (pieu)} < R_p/10$  ;
- argiles :  $R_p/50 < f \text{ (pieu)} < R_p/25$  ;
- limons ; argiles sableuses :  $R_p/100 < f \text{ (pieu)} < R_p/50$  ;
- sables lâches a moyens :  $R_p/150 < f \text{ (pieu)} < R_p/100$  ;
- sables moyens a compacts :  $R_p/500 < f \text{ (pieu)} < R_p/150$ .

Pour les terrains purement cohérents, Kerisel a proposé la relation suivante :

$$f = C_u \cdot \frac{1 + C_u^2}{1 + 7C_u^2} \quad (f \text{ et } C_u \text{ en bar}).$$

Remarque : Les valeurs de frottement dont il a été question ci-dessus, sont des valeurs limites .La valeur nominale du frottement sur le fut du pieu sera donc obtenue en appliquant a ces valeurs limites, un coefficient de sécurité compris entre 2 et 3. [31]

### III-3-10- Ordre de grandeur $R_p$ selon le terrain :

Voir tableau III-2[31]

Tableau III-2 : Valeurs de  $R_p$  selon le terrain [31]

Nature du terrain	Valeur de $R_p$ (en bar)
Vase, tourbe, argile molle	$R_p < 10$
Argile, limon, silt argileux, craie altérée, marne tendre	$10 < R_p < 25$
Sable lâche à moyennement compact, marne raide	$25 < R_p < 50$
Sable compact, grave compacte	$50 < R_p < 250$

### III-3-11- Limites d'un essai de pénétration statique :

L'inconvénient majeur peut être dans certain cas la non-représentativité de l'essai. Si un point dur est rencontré, il amènera à de mauvais paramètres. En fonction du matériel roulant choisi – qui est l'appui pour enfoncer le cône –, on peut également être limité. Le refus sera parfois obtenu avant la profondeur projetée minimale d'investigation. En aucune façon, un essai de pénétration ne pourra donc se substituer a une reconnaissance géologique soignée. Sauf cas particulier d'un site déjà bien connu. [36]

### III-3-12- Conclusion :

Le pénétromètre statique représente un outil d'investigation géotechnique de qualité ; d'utilisation simple et rapide, il est fiable dans tous les terrains homogènes meubles.

Il est toujours intéressant d'effectuer, en parallèle d'une campagne pénétrométrique, quelque sondage carotté d'étalonnage. [31]

## III-4-ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE :

### III-4-1-Historique :

Le pénétromètre dynamique est le descendant direct de la technique sommaire d'investigation à la barre à mine enfoncée à la masse ; il a fait l'objet d'une certaine normalisation au début du XX<sup>e</sup> siècle. [31]

### III-4-2- Domaine d'utilisation :

Le DCP peut être utilisé pour l'évaluation structurale de la chaussée et pour une étude de reconnaissance de sol. Il permet de dresser un profil de rigidité du sol, d'établir l'épaisseur et la profondeur des couches, et de déduire les propriétés mécaniques in situ des matériaux et des sols supports. Il peut aussi être utile pour déterminer la profondeur du socle rocheux lorsque celui-ci est près de la surface ou pour vérifier la profondeur de dégel printanier dans le corps de la chaussée. Enfin, il s'avère utile pour la détection et la caractérisation des couches de faible consistance (tourbe et argile molle) et des noyaux des remblais légers.

Il convient de noter qu'en principe, l'essai de pénétration dynamique n'est pas adapté à l'étude des sols cohérents, ni à celle des sols très lâches. [31], [39]

### III-4-3-Types de pénétromètre dynamique :

Nombreux sont les pénétromètres dynamiques utilisées dans le monde, dans ce cadre on peut citer : pénétromètre dynamique léger manuel (pénétromètre FONDASOL...), pénétromètre dynamique léger motorisé (ETF-Toulouse...), et le Pénétromètre lourd (Andina...).

Tous ces pénétromètres diffèrent l'un de l'autre par :

- Diamètre de pointe,
- Diamètre de tige,
- Poids du mouton,
- Hauteur de chute.

Devant le foisonnement des modèles, la commission internationale de standardisation a décidé de ne retenir que deux types :

- les pénétromètres dynamiques type A(P.D.A) utilisant, soit une boue de forage, soit un tubage de revêtement extérieur, pour éliminer le frottement latéral ;
- les pénétromètres dynamiques type B(P.D.B) mis en œuvre sans tubage extérieur ni boue de forage, et dans lesquels la valeur de frottement latéral sur les tiges est estimée par mesure du couple nécessaire à la rotation du train de tiges.

Pour les deux types les pointes peuvent être de type « fixe » ou du type « perdu ».  
Deux modèles de pointes ont été standardisés : [31], [36]

\*pour le pénétromètre P.D.A :

- Angle de pointe  $90^\circ$ ,
- Section nominale  $30 \text{ cm}^2$ ,
- Diamètre  $62 \pm 0,2 \text{ mm}$ ,
- Longueur de la partie cylindrique  $62 \pm 0,2 \text{ mm}$ ,
- Diamètre des tiges  $40$  à  $45 \text{ mm}$  ;

\* pour le pénétromètre P.D.B :

- Angle de pointe  $90^\circ$ ,
- Section nominale  $20 \text{ cm}^2$ ,
- Diamètre  $51 \pm 0,2 \text{ mm}$ ,
- Longueur de la partie cylindrique  $51 \pm 0,2 \text{ mm}$ ,
- Diamètre des tiges  $32 \pm 0,3 \text{ mm}$ .

Le poids du mouton et la hauteur de chute ont été aussi codifiés :

- Poids du mouton  $63,5 \pm 0,5 \text{ kg}$ ,
- Hauteur de chute  $32 \pm 0,3 \text{ mm}$ .

La cadence de battage recommandée est de 30 coups par minute. Cette cadence ne doit pas être dépassée dans les sols cohérents.

Avec l'évolution de la technologie les chercheurs ont développé des pénétromètres Automatique Numérique Dynamique Assisté par ordinateur, comme le pénétromètre PANDA. [31] ,[36]



Figure III-6 : Vue d'ensemble d'un pénétromètre

#### III-4-4-Principe et réalisation de l'essai :

L'essai au pénétromètre dynamique consiste à faire pénétrer dans le sol, par battage, des tiges métalliques à l'aide d'un mouton tombant en chute libre. Il est conçu pour donner un ordre de grandeur de la résistance du terrain jusqu'à la profondeur désirée (si possible).

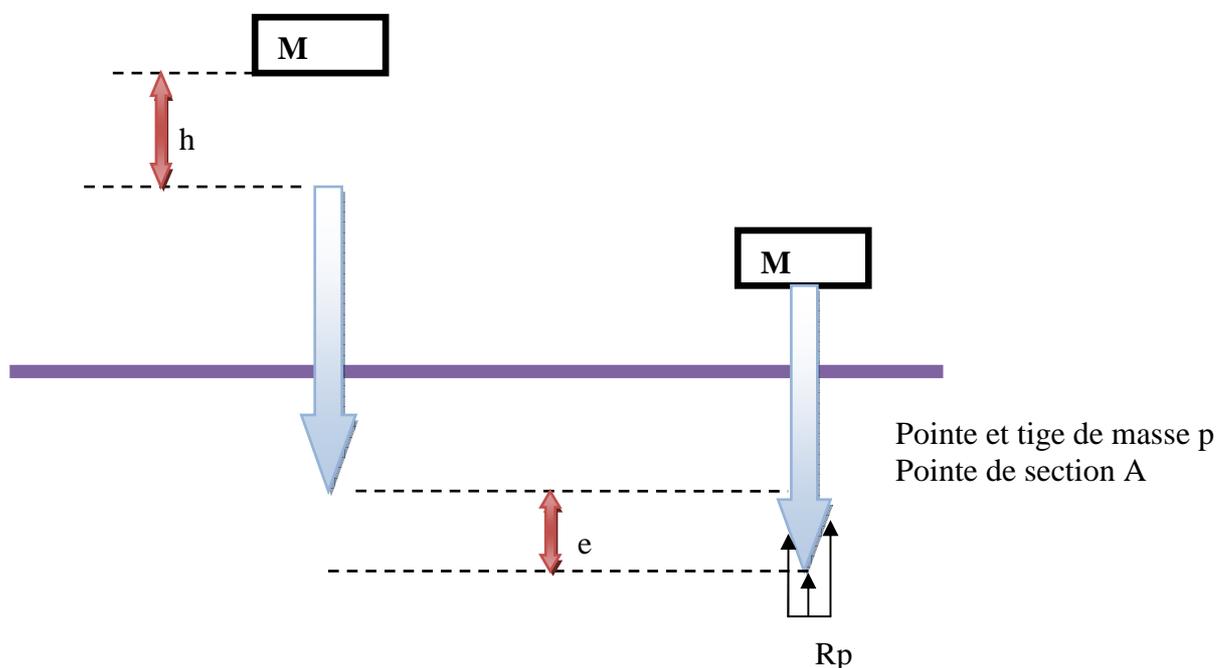


Figure III-7 : Schéma de principe de l'essai au pénétromètre dynamique [36]

La mise en œuvre de cet appareil est particulièrement simple et ne nécessite aucun forage préalable. L'appareil étant installé sur le point d'exploration, l'opérateur trace sur le train de tiges, une série de repères espacés entre eux de 10 ou de 20 cm, comptés à partir de la pointe. Lors de battage en continu il note le nombre de coups de mouton  $N$  nécessaire à l'enfoncement de train de tiges, d'une hauteur comprise entre deux repères successifs. [36]

**III-4-5- Présentation des résultats :**

Les résultats des essais sont représentés par des graphiques donnant en fonction de la profondeur atteinte par la pointe de l'appareil :

- Soit le nombre de coups  $N$ , correspondant à un enfoncement de  $\Delta h$  (la résistance est proportionnelle au nombre de coups),
- Soit la résistance en pointe déduite de la formule dite des Hollandais.

Ces diagrammes fournissent un profil continu de la résistance du terrain à la pénétration jusqu'à la profondeur atteinte. Ces graphiques n'ont de réelle signification sauf si le frottement latéral de tiges sur le terrain a peu été éliminé. [31], [36]

On appelle refus l'enfoncement de la pointe correspondant à un coup de mouton. On a donc :

$$e = \frac{\Delta h}{N} .$$

$e=0$  ; cas de refus absolu. [31], [36]

**III-4-6- Interprétation de l'essai de pénétration dynamique :**

L'interprétation de l'essai de pénétration dynamique est essentiellement fonction du type d'appareil utilisé. Lorsque le diamètre de la pointe est sensiblement identique à celui de train de tiges, il est impossible de dissocier l'effort de pointe de frottement latéral. [31], [36]

Les appareils à pointe élargie ne mobilisent en principe que la résistance de pointe. Dans la mesure où l'énergie de battage est uniquement dépensée pour la pénétration de la pointe, on peut considérer que la courbe : nombre de coups en fonction de la profondeur, fournit une bonne appréciation de la résistance des terrains traversés. Cette résistance est conditionnée par la densité relative du terrain, pour les terrains pulvérulents secs, ou pour les terrains pulvérulents aquifères de grande perméabilité. Pour les terrains cohérents saturés, ou les terrains pulvérulents fins et aquifères, une grande part de l'énergie de battage est absorbée par l'eau interstitielle, ce qui fausse l'interprétation. [31], [36]

Règles : ne jamais considérer comme porteuse une couche où l'on a simplement constaté un accroissement brutal de la résistance de pointe si cette couche n'a pas été traversée sur plusieurs mètres. [36]

**III-4-7- Détermination de la contrainte admissible d'un sol de fondation à partir d'un essai au pénétromètre dynamique :**➤ **FONDATION SUPERFICIELLE : [31]**

La relation la plus courante est :

$$q_a = R_{dyn}/20$$

$R_{dyn}$  étant calculé à partir de la formule des Hollandais.

- CALCUL DE LA CHARGE PORTANTE NOMINALE DE POINTE D'UN PIEUX BATTU  
 $SQ_{pn}$  : [31]

Ce mode de calcul ne vaut que pour les pieux mis en place par battage.

Si on admet la correspondance entre la portance statique et la portance dynamique, on peut écrire :

$$Q_{pn} = \frac{1}{F} R_{dyn} . S$$

S : section droite du pieu,

F : coefficient de sécurité pris égal à 6 quand  $R_{dyn}$  est calculé à partir de la formule des Hollandais.

#### III-4-8-Conclusion :

La rapidité d'exécution, la facilité de mise en œuvre permettent de multiplier à peu de frais l'investigation de grandes surfaces en multipliant le nombre d'essais et de vérifier, très facilement, par corrélation, la variation des caractéristiques d'un sol d'un point à un autre de la fondation.

Les limites d'emploi du pénétromètre dynamique sont relativement étroites, et sont pour partie fonction de la puissance de l'appareil. [31], [36]

En ce qui concerne l'estimation de la portance, l'essai de pénétration dynamique n'est adapté, ni aux terrains cohérents saturés, ni aux terrains pulvérulents fins aquifères. [31]

### III-5- ESSAI DE PENETRATION STANDARD (S.P.T)

#### III-5-1-Historique :

L'origine de l'essai de pénétration standard S.P.T remonte aux environs de 1902 et est liée à l'introduction de la technique de prise d'échantillons au carottier. Les travaux de Terzaghi et Peck ont permis de codifier l'usage de cet appareil, tant pour l'étude des fondations profondes que pour celle des fondations superficielles. [31]

#### III-5-2-Appareillage :

Il est constitué d'un tube carottier en trois parties : [31], [40]

- Une tête de carottier de 178 mm de longueur comportant, à sa partie supérieure, un filetage permettant l'assemblage avec les tiges de forage, des orifices de sortie d'eau et des méplats pour le serrage.
- Un corps de carottier long de 559 mm, fendu longitudinalement selon ses génératrices.
- Un sabot de battage de 76 mm de long avec une trousse coupante de 19 mm et filetage d'assemblage avec le corps du carottier.

Les caractéristiques de l'appareil sont les suivantes : [31], [40]

- Longueur totale 813 mm,
- Longueur intérieure utile 635 mm,
- Diamètre extérieur 51 mm,
- Diamètre intérieur 35 mm.
- Le mouton de battage est de 63.5 kg.

Cet appareil standard peut connaître quelques variantes dans les dimensions du carottier, l'épaisseur de ses parois, et le poids du mouton de battage.

### III-5-3-Présentation des résultats :

L'essai S.P.T permet de prélever des échantillons remaniés. Il permet donc une identification des sols qui complète utilement les données du forage préalable.

Les documents qui seront fournis devront faire apparaître : [31] [36]

- Les résultats et les profondeurs des essais, ainsi que la nature des couches traversées, leurs épaisseurs et leurs caractéristiques et les valeurs de N correspondantes.
- les niveaux d'eaux éventuellement rencontrés.
- types de tiges et le moyen de percussion.

### III-5-4-Correction à apporter à la valeur de N :

- SOL PULVERULENT IMMERGE : [31]

Si N' est le nombre fourni par l'essai dans le matériau immergé, le nombre N caractéristique du même matériau est fourni, selon Terzaghi par la relation :

$$N = 0.5 N' + 7.5$$

- S.P.T. REALISE A UNE FAIBLE PROFONDEUR D : [31]

$$N = N' + \frac{35}{7 + \gamma D}$$

Avec :

$\gamma$  : poids spécifique du sol en t/m<sup>2</sup>;

D : profondeur exprimé en mètres.

Si le sol est immergé, on remplace  $\gamma$  par  $\gamma'$  : poids spécifique déjaugé du sol considéré.

### III-5-5-Fondation superficielle dans du sable (calcul de $q_a$ à partir de N) :

- ABAQUES DE TERZAGHI ET PECK : [31]

Connaissant le nombre N, l'abaque 1 (annexe 4) fournit directement la valeur de  $q_a$  du terrain de fondation « établi pour un coefficient de sécurité F=3 » en fonction de la largeur B de la semelle (sans distinction de forme). La semelle est posée à la surface du sol ou encastrée sans surcharge, la nappe phréatique étant située à une profondeur  $h_e \geq B$  au-dessous de l'assise.

Pour une semelle carrée on devra choisir B pour que :

$$\frac{P}{B^2} \leq q_a$$

➤ L'abaque 2 de l'annexe 4 représente le surcroît de portance qu'on peut ajouter à la valeur  $q_a$  définie par l'abaque 1 de l'annexe 4, lorsque le terrain d'assise de la semelle subit une surcharge de terrain de hauteur  $h$ . [31]

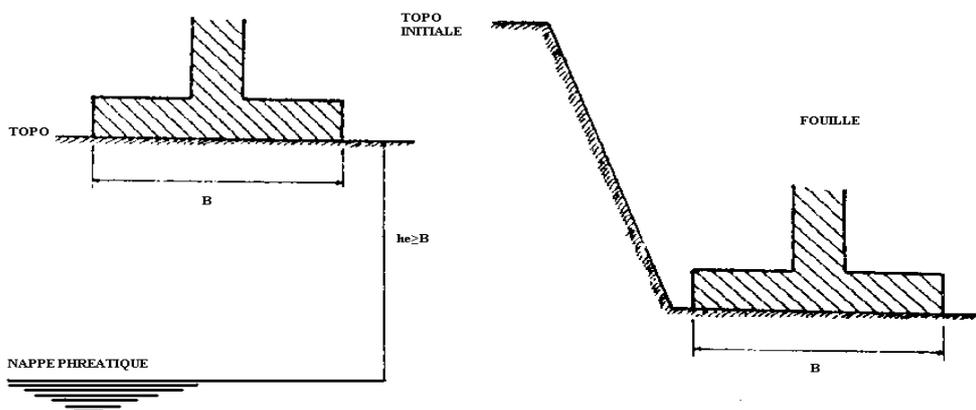


Figure III-8. Schéma d'une semelle sans surcharge latérale. [31]

Remarque :

➤ Si la nappe phréatique est située sous l'assise à une profondeur inférieure à  $B$ , ou si elle est située au-dessus de l'assise, la valeur de  $q_a$  obtenue au moyen des abaques est à diviser par 2. [31]

Les deux abaques précédents (annexe 8), (annexe 9) ne prennent pas en compte l'effet du tassement sous les fondations ; pour cette raison Terzaghi et Peck ont proposés un troisième abaque dans lequel ils ont limité le tassement sous les fondations à 2.5 cm (cf figure III-10).

La contrainte admissible  $q'_a$  est définie pour un coefficient de sécurité  $F=3$ . La valeur de  $q'_a$  est à diviser par 2 dans le cas d'une nappe phréatique haute et éventuellement à majorer de l'effet d'une surcharge latérale selon l'abaque.

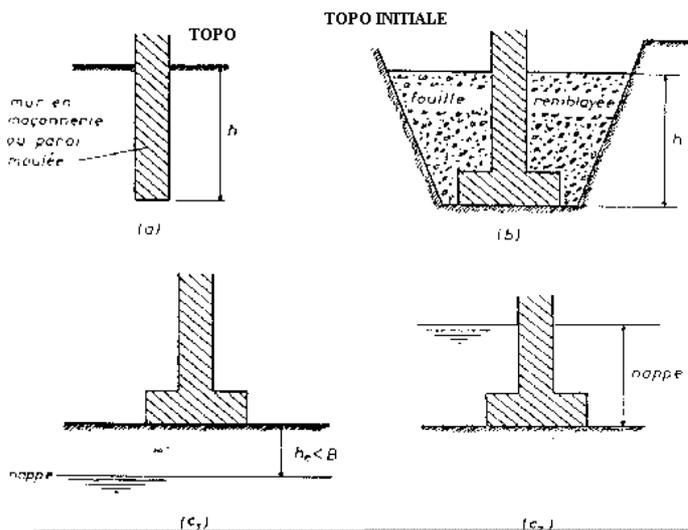


Figure III-9 : Schéma d'une semelle avec surcharge latérale. [31]

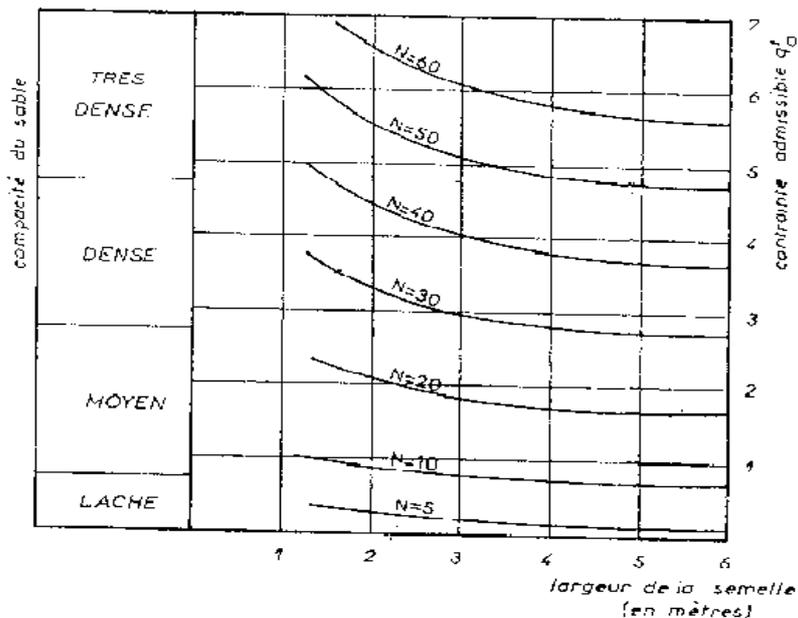


Figure III-10 : Contrainte admissible pour que le tassement absolu reste inferieur à 2,5 [31]

➤ RELATION DE MEYERHOF : [31]

En tenant compte d'un encastrement D la relation de Meyerhof s'écrit :

$$q_a = (NB/30)(1 + D/B).$$

B et D sont exprimés en pieds ;  $q_a$  est exprimé en t/pieds<sup>2</sup>.

Si la semelle est posée en surface de la couche porteuse (D=0), elle devient :

$$q_a = (NB/30).$$

Cette relation ne prend pas en compte la position de la nappe par rapport à la fondation.

➤ CAS DES RADIERS FONDES SUR DU SABLE :

Admettant que le tassement maximum du radier soit limité à 5 cm, Terzaghi et Peck proposent d'adopter les valeurs de  $q_a$  données dans le tableau suivant :

Tableau III-3 : les valeurs de  $q_a$  en fonction de la compacité du sable. [31]

N	Compacité du sable	$q_a$
<10	Peu compact	Doit être d'abord compacté
10-30	Moyennement compact	0.7-2.5
30-50	Compact	2.5-4.5
>50	Très compact	>4.5

Cette estimation suppose que l'épaisseur de la couche de sable est au moins égale à la largeur B du radier. Si la nappe phréatique est située très au dessous du radier ( $>B/2$ ), on peut majorer de 10 à 20% les valeurs du tableau III-3.

### III-5-6- Fondations superficielles dans l'argile : [41]

Terzaghi et Peck ont proposé une corrélation entre  $R_c$  et N cf tableau III-4.

Comme  $q_a$  vaut approximativement  $R_c$  on peut en déduire la valeur de  $q_a$  de l'application du tableau de corrélation entre  $R_c$  et N.

Tableau III-4 : les valeurs de  $q_a$  en fonction de la compacité du sable. [31]

N	Compacité du sable	$q_a$
<10	Peu compact	Doit être d'abord compacté
10-30	Moyennement compact	0.7-2.5
30-50	Compact	2.5-4.5
>50	Très compact	>4.5

### III-5-7-Fondation profonde :

Toutes les recherches effectuées pour tenter de calculer la portance des pieux à partir des valeurs de N fournies par l'essai S.P.T ; forment un témoignage de dispersion des résultats, surtout dans les argiles.

### III-5-8-Conclusion sur l'essai S.P.T:

Le S.P.T. (Standard Pénétration Test) est l'un des outils de reconnaissance de sol les plus anciens et les plus répandus. Le S.P.T. est limité aux sols pulvérulents, comme il est aussi limité par la profondeur d'investigation qui ne doit pas dépasser une trentaine de mètre. Il est exclu l'emploi de cette méthode seule, en dehors d'une investigation géologique détaillée, et en l'absence d'essais géotechniques comparatifs. [41]

### III-6-ESSAI PRESSIOMETRIQUE :

Ce sont des essais de chargement in situ capable de fournir des relations contraintes déformation jusqu'à la rupture avec des conditions aux limites spatiales relativement bien définies. Ajoutant également que les méthodes de calcul établies pour ces essais se trouvent libérées, de l'habituelle distinction entre sols pulvérulents et sols cohérents.

La fiabilité des résultats, à la condition du strict respect du mode opératoire, en a fait l'un des essais les plus répandus pour le dimensionnement des ouvrages les plus importants. [31], [42], [43]

- Il peut être réalisé dans tous les types de sol.
- Selon Jamiolkowski et Al (1985) il est le seul à fournir une relation contrainte-déformation du sol, caractérisée par le module pressiométrique  $E_m$  et la pression limite  $p_l$ .

**III-6-1- Historique :**

C'est à L. Menard ingénieur civil de l'Ecole des Ponts et Chaussées, Master of sciences de l'Université de l'Illinois, que l'on doit, à partir de 1957 la mise au point définitif de l'essai pressiométrique. [20]

**III-6-2-Pressiomètre :**

C'est un appareil simple, pratique et d'utilisation relativement aisée quoique nécessitant beaucoup de soins, l'apparition de cet appareil a ouvert en mécanique des sols, la voie à des recherches particulièrement intéressantes et qui a fait faire à l'étude des fondations des progrès considérables. On peut dire qu'il s'agit d'une famille à part dont la technologie et surtout la méthode d'interprétation se différencient totalement des autres essais. [31], [36]

Depuis la mise en service des premiers pressiomètre, plusieurs générations d'appareils ont vu le jour. Le principe en est resté immuable, mais de nombreux perfectionnements ont été apportés qui permettent d'atteindre les pressions de 10 MPa, alors qu'à l'origine les premiers appareils étaient limités à 1 MPa. [31], [36]



Figure III-11 : Pressiomètre avec une sonde mono cellulaire

**III-6-3-Principaux types d'appareils :**

Il existe 2 principaux types de pressiomètre en ce qui a trait à la mesure des déformations : les appareils où cette mesure est faite en mesurant le volume du fluide injecté pour dilater la sonde et ceux où cette mesure est faite en mesurant directement les variations de diamètres de la sonde. [44]

- PRESSIOMÈTRE MÉNARD (type G-Am) ,
- TEXAM,
- PENCEL,
- TRI-MODE,
- BOREMAC,
- PRESSIOMETRE AUTO-FOREUR DU LCPC,
- SONDE CONIQUE DE LADANYI.

**III-6-4- Principes et hypothèses de l'essai pressiométrique :**

Les essais pressiométriques sont des essais de chargement in situ réalisés par expansion d'une cavité cylindrique. Les contraintes sont exercées sur les parois du cylindre, en contact avec le sol ou le roc en place, à l'aide d'un fluide agissant sous une ou des membranes dilatables. On obtient ainsi une relation contrainte-déformation qui peut-être analysée théoriquement, ou empiriquement selon les hypothèses sur les propriétés du milieu. [36], [44]

➤ HYPOTHESES.

- L'appareil exerce un champ de contraintes radiales uniformes sur une certaine longueur de la sonde. Cette hypothèse a conduit à la conception des sondes tri cellulaires par Louis Ménard.
- Le milieu comporte une phase pseudo-élastique et une phase plastique.
- Dans le cas où la mesure de la déformation est faite de façon volumétrique, on considère que le milieu est isotrope dans la zone de l'essai. [44]

**III-6-5- Réalisation d'un essai pressiométrique :**

L'essai doit être donc réalisé dans un forage dont les parois sont en équilibre. Une fois la sonde descendue et bloquée à la profondeur désirée, on ouvre les robinets d'admission et le niveau d'eau dans le voyant s'abaisse alors et donne une lecture correspondant à celle de la colonne d'eau au niveau de la sonde ; la mise en pression s'effectue ensuite par palier. L'essai Ménard dit normalisé doit comprendre environ une dizaine de paliers de pression. Les lectures de déformations sont faites pour chaque palier de pression 15 secondes, 30 secondes et 1 minute après la fin de la mise en pression, (cf figure III-12). [36], [44]

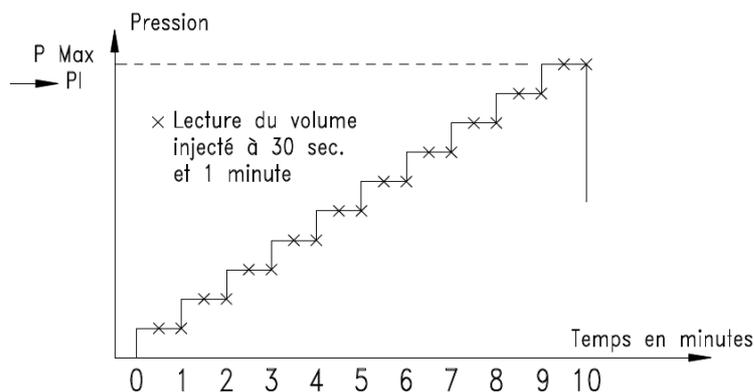


Figure III-12 : Procédure d'essai type Menard [44]

**III-6-6- Résultats des essais pressiométriques :**

**III-6-6-1- Courbe pressiométrique :**

La figure III-13 représente une courbe pressiométrique brute. Elle donne dans le cas d'un appareil à mesure volumétrique comme le G-Am ou le TEXAM les volumes injectés dans la sonde en fonction des pressions. [31], [44]

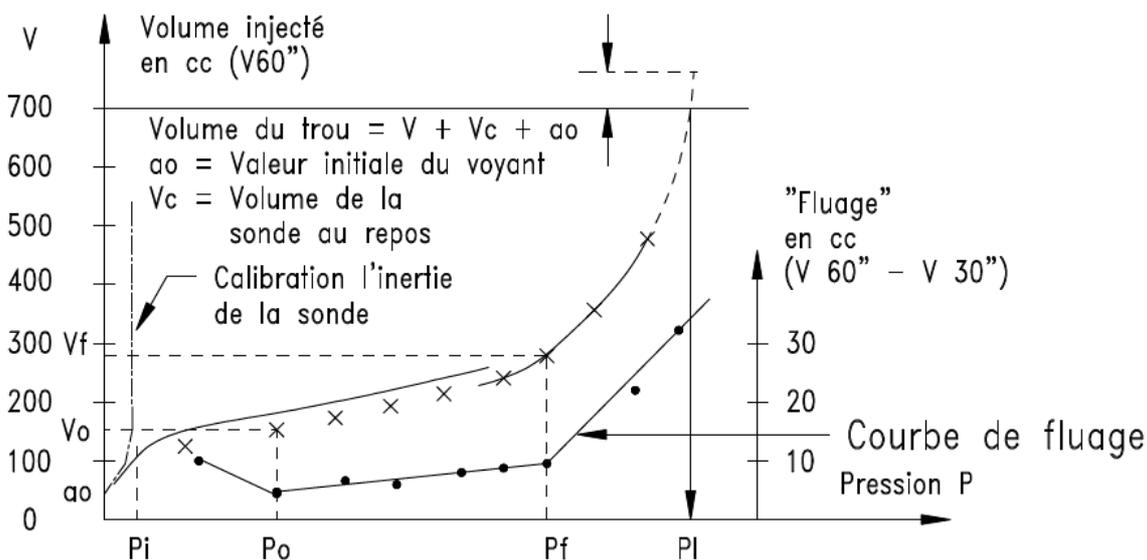


Figure III-13 : Courbe pressiométrique brute -TYPE MENARD [44]

La courbe pression-volume présente 3 phases (cf figure III-13)

- La phase de recompression : pour laquelle l'accroissement du volume de la sonde est grand par rapport à l'augmentation de la pression.
- La phase pseudo-élastique : c'est une partie quasi rectiligne d'une pression  $P_0$  à une pression  $P_f$ , qui correspond sensiblement à une loi de proportionnalité entre pression et déformation.
- La phase plastique menant à la rupture : c'est une partie à courbure variable, de plus en plus redressée et tendant vers une asymptote verticale d'abscisse  $P_l$ .

Au cours d'un palier de pression donné, il se produit dans le terrain une déformation qui augmente en fonction du temps et se traduit par un accroissement correspondant du volume de la sonde ; cette déformation est représentée par la différence ( $V_{60''} - V_{30''}$ ). La courbe de fluage est établie en portant en abscisses la pression, et en ordonnées, la différence ( $V_{60''} - V_{30''}$ ) correspondante. La courbe de fluage présente aussi les mêmes trois phases que la courbe pression -volume. [31], [44]

### III-6-6-2- Paramètres obtenus dans un essai pressiométrique :

#### ➤ PRESSION LIMITE : $P_l$ [44]

La pression limite correspond à la rupture du sol environnant. Elle est donnée par l'asymptote de la courbe pressiométrique. Comme cette asymptote n'est pas toujours facile à définir, une autre définition a été donnée pour la pression limite à savoir la pression correspondant au doublement de la cavité cylindrique initiale. Cette valeur tient compte de la pression d'inertie de la sonde  $P_i$  qui étant généralement très faible ( $P_i < 50$  KPa) est souvent négligée sauf dans les argiles molles.

#### ➤ MODULE PRESSIOMETRIQUE : $E$ [44]

Dans un milieu élastique la relation entre le module de cisaillement  $G$  et le module de Young est :

$$G = E / 2 (1 + \nu)$$

Où  $\nu$  est le coefficient de Poisson.

Dans le cas du module pressiométrique  $E_m$  le coefficient de Poisson  $\nu = 0,33$ .

Si  $V_c$  est le volume de la sonde au repos on obtient :

$$E_m = 2,66 (V_c + V_m) \cdot \Delta P / \Delta V \quad (\text{cf figure III-14})$$

$\Delta P / \Delta V$  est la pente de la courbe pressiométrique dans sa partie linéaire pseudo-élastique prise au volume  $V_m$  à mi-distance entre  $V_0$  le volume correspondant à la pression de recompression de la paroi qui est plus ou moins égale à la pression du sol au repos et  $V_f$  le volume correspondant à la pression de fluage. [44]

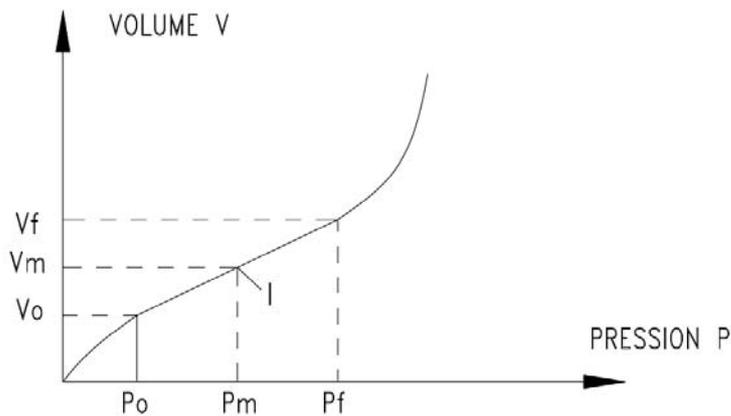


Figure III-14 : Principe de calcul du module pressiométrique  $E_m$  [44]

➤ **PRESSION DE FLUAGE :  $P_f$**

Cette pression correspond à la fin de la phase pseudo-élastique. Bien que cette valeur ne soit pas utilisée comme paramètre de calcul de fondation il est important de la déterminer pour valider les résultats. [44]

### III-6-7 Utilisation des résultats pressiométriques :

#### III-6-7-1- Capacité portante d'une fondation superficielle :

Un essai pressiométrique est essentiellement un essai de chargement in situ mené jusqu'à la rupture. La théorie et de nombreuses expériences ont montré que la capacité portante à la rupture est proportionnelle à la pression limite  $P_l$  du terrain. Le facteur de proportionnalité est fonction de la profondeur relative et la forme de la fondation ainsi que du type de terrain. [31], [44]

Si on appelle :

- $Q_l$  : la capacité portante à la rupture ;
- $Q_0$  : la pression naturel vertical du terrain au niveau de la fondation après construction ;
- $P_l$  : la pression limite ;
- $P_0$  : la pression horizontale du terrain `au repos` au niveau de l'essai ;
- $K$  : le coefficient de portance sans dimension.

On a la relation générale suivante :

$$Q_l - Q_0 = K (P_l - P_0).$$

Pour définir le facteur  $K$  Les Techniques Louis Ménard ont classé les matériaux en 4 catégories (cf tableau III-5). [31], [44]

Tableau III-5 : Catégories de sols [31]

GAMME DE $P_l$ en kPa	TYPE DE SOL	CATEGORIE
0-1200 0-700	ARGILE SILT	I
1800-4000 1200-3000 400-800 1000-3000	ARGILE FERME SILT COMPACT SABLE COMPRESSIBLE ROCHE TENDRE	II
1000-2000 4000-10000	SABLE ET GRAVIER ROC	III
3000-6000	SABLE ET GRAVIER TRES COMPACT	IIIA

Les résultats indiquant les valeurs du facteur K, sont résumés sur la figure III-15. La valeur minimum de K qui est égale à 0,8 correspond à une fondation placée à la surface du sol. On remarque qu'au dessous d'une certaine profondeur relative  $h/R$ , où R est la demi largeur de la fondation et h sa profondeur, le facteur K devient constant. Cette profondeur est appelée la profondeur critique (profondeur à partir de laquelle la pression de rupture  $Q_l - Q_0$  dans le terrain supposé homogène reste constante) est varié de 4 pour les semelles circulaires ou carrées dans les argiles à 22 pour les semelles filantes dans les sables et graviers très compacts. [31], [44]

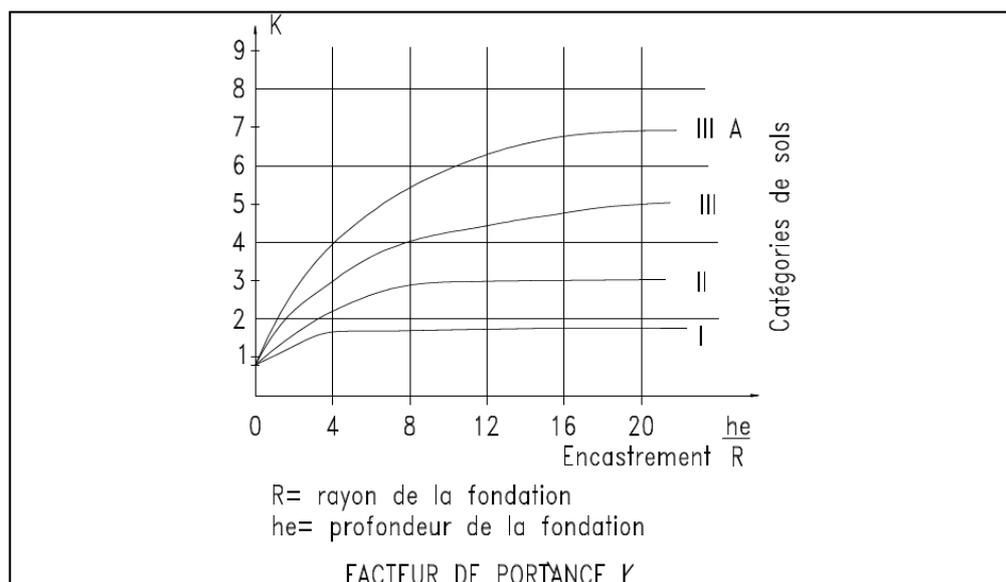
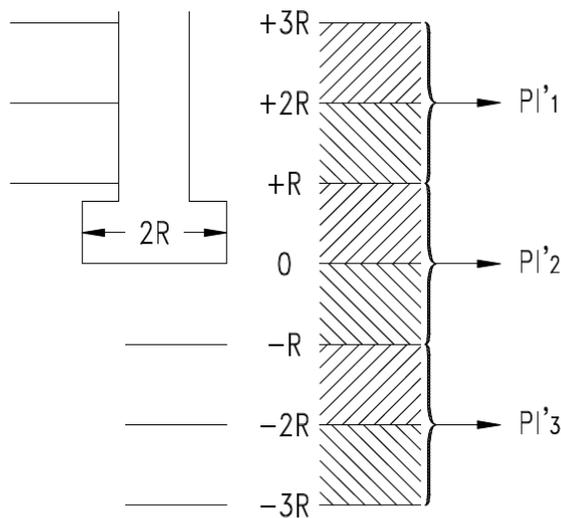


Figure-III-15 : Facteur de portance en fonction de l'encastrement [31]

## ➤ CAS DES TERRAINS HÉTÉROGÈNES



$$P_{le} = \sqrt[3]{P'1 \times P'2 \times P'3}$$

Figure-III-16 : Détermination de la pression limite équivalente [31]

Dans le cas où les fondations sont faites dans un terrain dont les propriétés varient avec la profondeur il est nécessaire d'utiliser une Pression limite équivalente  $P_{le}$ , qui est définie comme la moyenne géométrique des valeurs de  $PI$  obtenues à proximité de la fondation. Le terrain est divisé en tranche d'épaisseur  $R$  égale à la demi largeur de la fondation. Si on appelle  $P'1$  la moyenne géométrique des pressions limites des couches situées entre  $3R$  et  $+R$  au-dessus de la fondation,  $P'2$  la moyenne géométrique des pressions limites des couches situées entre  $+R$  et  $-R$  soit de part et d'autre du niveau de la fondation et  $P'3$  la moyenne géométrique des pressions limites des couches situées entre  $(-R$  et  $-3R)$  au dessous de la fondation, on obtient :

$$P_{le} = \sqrt[3]{P'1 \times P'2 \times P'3}$$

Pour les fondations fondées à faible profondeur, le premier terme  $P'1$  n'est pas pris en compte et  $P_{le}$  est égal à la racine carrée du produit des 2 autres termes.

## ➤ CONTRAINTE ADMISSIBLE D'UNE SEMELLE DE FONDATION : [31], [44]

La contrainte limite sous la semelle est définie par la relation :

$$q_l = k(p_1 - p_0) + q_0 .$$

La contrainte admissible  $q_a$  s'en déduit par application d'un coefficient de sécurité égale à 3 à la première partie du deuxième membre de l'expression ci-dessus :

$$q_a = (k/3)(p_1 - p_0) + q_0 .$$

Dans le cas d'une semelle peu encastree, les paramètres  $p_0$  et  $q_0$  sont en général négligeables devant  $p_1$  et on a la relation simple suivante :

$$q_a = k p_1 / 3 .$$

Si l'encastrement correspond à  $k=1$ , on aura :

$$q_a = p_l/3 .$$

➤ CAS PARTICULIERS : [31], [44]

\_ Semelles rapprochées :

Soit  $R$  la demi-largeur d'une semelle dans le sens d'alignement des poteaux, et «  $l$  » la distance entre les bords de deux semelles voisines.

- Si  $l/R > 2$ : application de la relation générale exposée ci-dessus.
- Si  $l/R \leq 2$ : le facteur de portance  $k$  est limité à la valeur  $k_l$  telle que ;

$$k_l < 1 + (l/R).$$

\_ Si  $p$  est la pression du côté le moins chargé, et  $P$  la pression du côté le plus chargé, la stabilité générale à l'enfoncement est obtenue si :

$$(p + P)/2 \leq q_a.$$

$q_a$  : Contrainte admissible pour la semelle supposée chargée uniformément ;

La stabilité au renversement est assurée si :

$$P < 1,5q_a.$$

Cette relation est valable pour  $h/R > 1$  ( $h$  : profondeur d'encastrement de la semelle).

Si  $h/R \leq 1$ , on considère une semelle fictive constituée par le tiers le plus chargé de la fondation réelle et l'on calcule sa contrainte admissible  $q'_a$  que l'on compare à  $P$ .

### III-6-7-2-Capacité portante des fondations profondes :

Elle est composée de 2 éléments :

- 1 - la résistance en pointe calculée comme précédemment avec le facteur de portance  $K$  tiré des abaques Ménard ;
- 2 - le frottement latéral  $S$ , qui comporte 2 valeurs  $S_1$  qui s'applique sur une hauteur égale à 3 diamètres au dessus de la base du pieu et  $S_2$  pour le reste du pieu.

Dans les sols très compressibles tassant encore sous leur propre poids le frottement latéral devient négatif .Il est appelé  $S_3$  et pour  $E$  inférieur à 15 est pris égal à 10 KPa. Lorsque les sols sont surchargés la valeur de  $S_3$  est augmentée en fonction de  $P_l$  (cf figure III-18) [44]

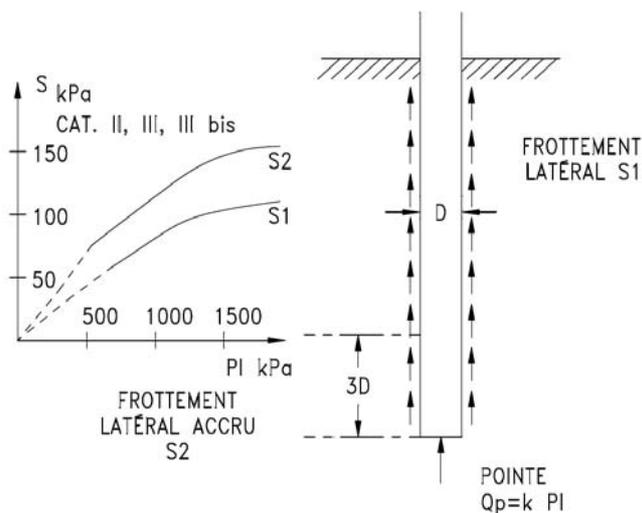


Figure-III-17 : Capacité portante d'un pieu [44]

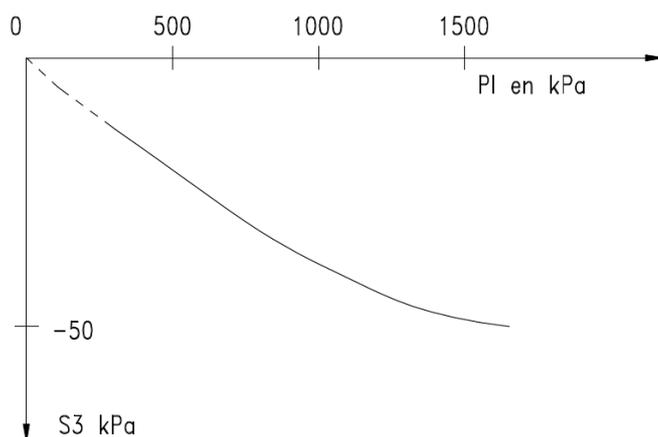


Figure-III-18 : Frottement latéral négatif [44]

### III-6-8-Conclusion :

Cet appareil, constitué d'une sonde cylindrique, expansible latéralement, permet de mesurer les déformations de la paroi sous l'effet d'une pression variable. De la courbe effort-déformation on déduit, par calculs, les caractéristiques du sol étudié qui permettent d'établir le taux de travail du sol sous semelles, la force portante des puits et pieux et d'évaluer les tassements absolus et différentiels. [40]

La rapidité d'exécution et d'interprétation permet de fournir très vite des résultats. Les interventions peuvent avoir lieu en cours de travaux quand un problème se pose ou simplement pour vérifier le taux de travail du sol en fond de fouille. Les essais pressiométrique ne sont pas toujours suffisants pour reconnaître complètement un site donné mais constituent un moyen complémentaire, très efficace et économique, aux sondages carottés. [40]

**III-7-ESSAI SCISSOMETRIQUE :**

L'essai scissométrique est l'essai de cisaillement non drainé le plus répandu, le cisaillement étant réalisé par rotation des pales rectangulaires. Son utilisation est fréquente pour la détermination de la cohésion non drainée des argiles qui est reliée au couple de torsion appliquée. [45]

**III-7-1- Historique :**

Sur la base des recherches effectuées essentiellement en Suède et en Grande-Bretagne, un appareil a été mis au point vers 1948, qui permet de mesurer in situ la cohésion non drainée des terrains cohérents saturés. [31]

**III-7-2- Scissomètre :**

Le scissomètre est un appareil de détermination en place de la résistance au cisaillement des sols fins, peu consistants et cohérents. [46]



Figure-III-19 : Scissomètre

**III-7-3- Différents types de scissomètre :**

Les divers modèles de scissomètres diffèrent assez peu les uns des autres, et sont tous basés sur le même principe. Sans les citer tous, nous mentionnerons : [31], [33]

- Les scissomètres utilisés en général pour des mesures en fond de forage, comme le scissomètre Acker, le scissomètre Wykeham et Farnell....
- Les scissomètres conçus pour être foncés directement, soit par battage, soit par vérinage ; on trouve le scissomètre Wykeham Farrance, le scissomètre Simec que l'on peut évidemment utiliser dans un forage.

**III-7-4- Appareillage :**

Le scissomètre se compose : [47]

- De pales rectangulaires disposées en croix de manière à former quatre dièdres orthogonaux,
- d'un train de tiges cylindriques solidaires des pales,
- un tube de protection à l'intérieur duquel le train de tige peut tourner librement, sans frottement sur le terrain ambiant,
- deux bras de rotation,
- un dynamomètre qui permet la mesure de la force nécessaire à la rotation des pales.

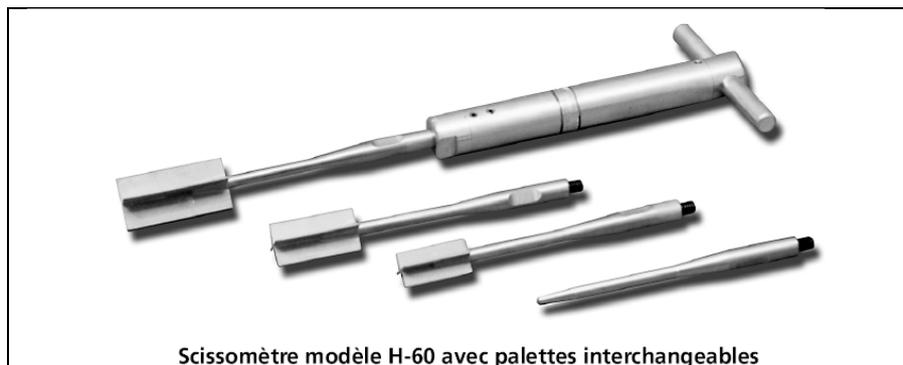


Figure-III-20 : Scissomètre modèle H-60 avec palettes interchangeables

**III-7-5- Principes et réalisation de l'essai scissométrique :**

Le scissomètre peut être utilisé dans un forage préparé de n'importe quelle façon. Ce forage peut être tubé ou non. Le scissomètre est introduit dans le forage et on ajoute des rallonges à l'arbre de torsion jusqu' à ce que l'appareil atteigne le fond du sondage. Le scissomètre est alors poussé dans le sol sans torsion à une profondeur suffisante pour être sous la zone remaniée par le forage. La profondeur la plus courante est de 45 cm sous le fond du forage. [31], [36]

Comme on peut utiliser le scissomètre par fonçage vertical par vérinage ou par battages lorsque le terrain est trop raide. On peut aussi utiliser le scissomètre dans des argiles molles, sans effectuer de forage au préalable, en enfonçant verticalement le scissomètre dans celles-ci. Dans ce cas, les palettes sont protégées pendant l'enfoncement par une pièce moulée ou un simple tube. Ensuite, le scissomètre est poussé hors de sa gaine et l'essai est effectué. Dans les sols de consistance très molle, il est possible de procéder ainsi jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 15m. Les pales sont arrêtées dans l'horizon ou doit être réalisé le cisaillement ; on exerce très lentement ( $0,1$  à  $1^\circ$  d'arc par seconde), soit à la main, soit par l'intermédiaire du réducteur, une traction horizontale sur le bras de rotation, pour créer un couple de rotation au niveau des pales. A chaque instant, le dynamomètre enregistre la réaction que le sol oppose à la rotation des pales. Le moment de rotation est égal au produit de la force mesurée au dynamomètre, par la distance de l'application de celle-ci et l'axe de la tige. [31], [36]

**III-7-6-Interprétation de l'essai scissométrique :**

Au moment de la rupture, il ya équilibre entre le moment résistant  $M$  du aux forces de cisaillement de terrain sur les parois cylindre emprisonné entre les pales et le couple  $f.l$  produit par le manipulateur ; [31]

$$M=f.l \text{ [31]}$$

Tel que :

$f$  : effort mesuré au dynamomètre ;

$l$  : longueur du bras actionné par le manipulateur.

Lors de cisaillement aucun drainage de l'eau interstitielle n'est possible ; on aura donc :

$$\varphi_u = 0 ;$$

$C_u$  : cohésion non drainée est égale à la résistance au cisaillement ainsi mesurée.

Le moment résistant  $M$  peut se décomposer en deux termes :

$M_1$  : issu de la résistance au cisaillement sur la surface latérale verticale du cylindre ;

$M_2$  : issu de la résistance au cisaillement sur les deux faces horizontales du cylindre.

On a donc en principe :

$$M=M_1+M_2 =f.l\text{[31]}$$

Considérons le cas du scissomètre à pales rectangulaires de rayon  $r$  et de hauteur  $h$  tel que :  $h=4r$ .  
Après tous calculs faits on aura la relation finale suivante :

$$C_u = \frac{3}{28\pi} \cdot \frac{f.l}{r^2} \cdot \text{[31]}$$

Les efforts sur le dynamomètre sont transformés au moyen de la formule ci-dessus en valeurs de  $C_u$ , sous forme d'un graphique (cf figure III-21). Ce graphique permet d'obtenir à la fois la valeur de pic et la valeur résiduelle de  $C_u$ . [31]

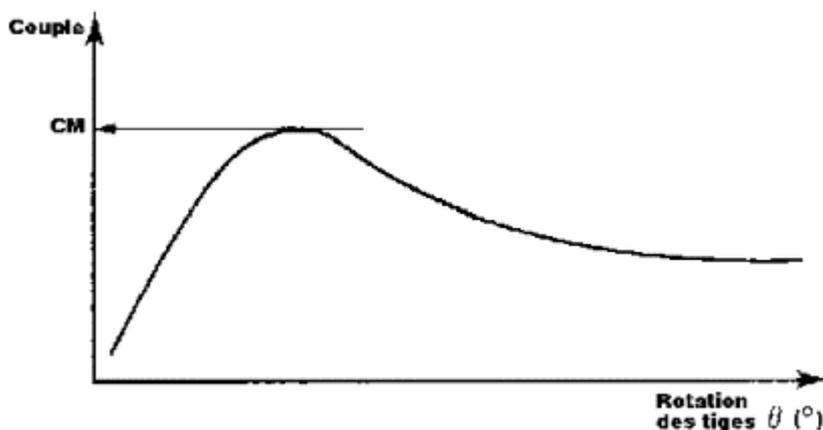


Figure-III-21 :  $C_u$  en fonction de l'angle de rotation [31]

**III-7-7-Limitations de l'essai au scissomètre :**

Enfin, les limitations de l'essai au scissomètre sont les suivantes : [31]

- Des précautions doivent être prises pour ne pas remanier le sol à essayer ;
- La présence de pierres dans le voisinage du scissomètre influence les résultats.

Il en est de même pour les limons et les sables, par couches ou par lentilles ; [36]

- La rupture se fait suivant une direction verticale et ne correspond pas nécessairement à une rupture oblique dans un sol anisotrope ;
- l'essai donne la résistance au cisaillement non drainé ;
- la résistance le long des surfaces horizontales de rupture est difficile à estimer avec précision. Pour cette raison on utilise parfois des scissomètres à axes concentriques avec des moulinets de garde au-dessus et en dessous du moulinet de mesure.

Ceci démontre, une fois de plus, qu'une étude géotechnique sérieuse doit toujours mobiliser plusieurs approches.

**III-8-CONCLUSION DU CHAPITRE III :**

Nous représentons ici des tableaux récapitulatifs de tous les essais in situ, que nous avons vus au cours de ce chapitre. Ils seront utilisés dans la partie représentation de la connaissance lors de la conception de notre SE.

Tableau III-6 : les résultats d'un essai de pénétration statique et ses limites.

ESSAI	TYPE DE SOL	RESULTAT FOURNI	RESULTAT DEDUIT	CORRECTIONS	LIMITES
ESSAI DE PENETRATION STATIQUE C.P.T.	Fiable dans tous les terrains homogènes	pénétrogramme	-Résistance de pointe : $R_p = 4p / \pi b^2$ -Frottement latéral total : $Q_{St} = Q_t - Q_c$ -Pourcentage de frottement : $R_f = \frac{FS}{R_p} \times 100$	-Diamètre de la pointe (négligeable) -Angle de la pointe (négligeable) -Vitesse de pénétration : *pour une argile, et une vitesse de pénétration de 2cm /S : $R_p (\text{à l'arrêt}) = R_p / 2$ * Pour une vitesse de pénétration de 1cm /S : $R_p$ reste sensiblement la même. -Pression interstitielle (généralement négligeable).	-Rencontre d'un point dur ;

Tableau III-7 : les résultats d'un essai de pénétration dynamique et ses limites.

ESSAI	TYPE DE SOL	RESULTAT FOURNI	RESULTAT DEDUIT	CORRECTIONS	LIMITES
ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE	Tous types de sols	Nombre de coups	-formule des Hollandais : $R_{dyn} = \frac{M^2 \cdot H \cdot g}{M + C_t} \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{N_{d10}}{\Delta h}$ -refus: $e = \frac{\Delta h}{N}$	Pas de corrections	-portance *terrains cohérents saturés *terrains pulvérulents fins aquifères

Tableau III-8: les paramètres déduits à partir d'un essai CPT.

ESSAI	COHESION	ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE	FONDATION SUPERFICIELLE	FONDATION PROFONDE	TASSEMENT
ESSAI DE PENETRATION STATIQUE C.P.T	Pénétromètre à pointe franche : $C_u = R_p / 10$ .  -pointe prolongée par une jupe : $C_u = R_p / 20$ .		-Terrains pulvérulents : $q_a = (R_p B / 36) \cdot (1 + D/B)$ . (MEYERHOF) Qui est présentée sous forme d(MEYERHOF) Qui est présentée sous forme d'abaques.  -Terrains cohérents saturés :  *semelle filante : $q_a = [(\pi + 2)/3] C_u + \gamma D$ (avec $F=3$ )  *Semelle isolée : multiplier la valeur de $q_a$ par le coefficient de forme 1, 3.	-Méthode de Begemann : $R_p = (1/2) (R_{p1} + R_{p2})$  -Méthode de Van der Ween : $R_p = (1/4,5B) \cdot \int_{-B}^{+3,5B} R_p(Z) dZ$ . Dans la pratique, on remplace l'intégrale par une dizaine de valeurs de $R_p$ réparties sur la hauteur 4,5 B au voisinage de la pointe  -Influence de la nature des terrains : $q_p = K R_p$ .  -effet d'échelle : $q_p = (b/B) R_p$	

Tableau III-9 : les paramètres déduits à partir d'un essai de pénétration dynamique.

ESSAI	COHESION	ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE	FONDATION SUPERFICIELLE	FONDATION PROFONDE	TASSEMENT
ESSAI DE PENETRATION DYNAMIQUE			$q_a = R_{dyn} / 20$	$Q_{pn} = \frac{1}{F} R_{dyn} \cdot S$	impossible

Tableau III-10 : les résultats d'un essai SPT et ses limites.

ESSAI	TYPE DE SOL	RESULTAT FOURNI	RESULTAT DEDUIT	CORRECTIONS	LIMITES
ESSAI S.P.T	sols pulvérulents	Nombre de coups		-Sol pulvérulent immergé : $N=0.5 N'+7.5$ - S.P.T. réalisé à une faible profondeur d : $N = N' + \frac{35}{7 + \gamma D}$	-sols pulvérulents -profondeur d'investigation limitée.

Tableau III-11 : les paramètres déduits à partir d'un essai SPT.

ESSAI	COHESION	ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE	FONDATION SUPERFICIELLE	FONDATION PROFONDE	TASSEMENT
ESSAI S.P.T		-sables fins contenant plus de 5% de silt : $\phi=25+0.15D_r$ -sables fins contenant moins de 5% de silt : $\phi=30+0.15D_r$	-Abaques de Terzaghi et Peck -Abaque xx ABAQUE X  - Relation de Meyerhof : $q_a = (NB/30)(1 + D/B).$ -Radies fondes sur du sable : tassement limité à 5cm voir ABAQUE de Terzaghi et Peck N°III-8  *si $h_e > B/2$ , on majore de 10 à 20% les valeurs du tableau ci-dessus.  -Dans l'argile : voir ABAQUE de Terzaghi et Peck n°III-10		

Tableau III-12 : les résultats d'un essai pressiométrique et ses limites.

ESSAI	TYPE DE SOL	RESULTAT FOURNI	RESULTAT DEDUIT	CORRECTIONS	LIMITES
ESSAI PRESSIOMETRIQUE		-courbe pression-volume brute - courbe de fluage	-Pression limite : pl *méthode log-log *méthode des volumes inverse * pression correspondant au doublement de la cavité cylindrique initiale * méthode des volumes relatifs - module pressiométriques : E $E_m = 2,66 (V_c + V_m) \times \Delta P / \Delta V$ - pression de fluage Pf : Cette pression correspond à la fin de la phase pseudo-élastique.		-Limiter son emploi à des applications du même type.  -Les tassements de grands radiers sur argiles molles doivent être corroborés par des essais de laboratoire.  -Les études faisant appel à la connaissance des caractéristiques C et $\phi$ des sols ne doivent être abordées qu'avec de sérieuses précautions.

Tableau III-13 : les résultats d'un essai scissométrique et ses limites.

ESSAI	TYPE DE SOL	RESULTAT FOURNI	RESULTAT DEDUIT	CORRECTIONS	LIMITES
ESSAI SCISSOMETRIQUE	Argiles	résistance au cisaillement	$C_u = \frac{3}{28\pi} \cdot \frac{f.l}{r^2}$		-la présence de pierres - la rupture se fait suivant une direction verticale - l'essai donne la résistance au cisaillement non drainé ; - la résistance le long des surfaces horizontales de rupture est difficile à estimer

Tableau III-14 : les paramètres déduits à partir d'un essai scissométrique.

ESSAI	COHESION	ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE	FONDATION SUPERFICIELLE	FONDATION PROFONDE	TASSEMENT
ESSAI SCISSOMÉTRIQUE	$C_u = \frac{3}{28\pi} \cdot \frac{f \cdot l}{r^2}$				

Tableau III-15 : les paramètres déduits à partir d'un essai pressiométrique.

ESSAI	COHESION	ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE	FONDATION SUPERFICIELLE	FONDATION PROFONDE	TASSEMENT
ESSAI PRESSIOMETRIQUE	-Milieu purement cohérent non drainé : $C_u = p_f - p_0$ et $C_u = (p_1 - p_0) / 4$	-Sols pulvérulents $p_1 - p_0 = 2,5 \times 2^{\frac{\varphi-24}{4}}$	-fondation superficielle $Q_1 - Q_0 = K (P_1 - P_0)$ . *cas des terrains hétérogènes $P_{lc} = \sqrt[3]{P_1' \times P_2' \times P_3'}$ -semelle de fondation * contrainte limite $q_1 = k(p_1 - p_0) + q_0$ * contrainte admissible : $q_a = (k/3)(p_1 - p_0) + q_0$ *pour une semelle peu encastree : $q_a = k p_1 / 3$ -Cas particuliers * Semelles rapprochées : Si $l/R > 2$ application de la formule générale ci-dessus Si $l/R \leq 2$ : $k_1 < 1 + (l/R)$ . Si $p$ est la pression du coté le moins chargé, et $P$ la pression du coté le plus chargé : $(p + P) / 2 \leq q_a$  -La stabilité au renversement est assurée si : $P < 1,5 q_a$ . Lorsque $h/R > 1$ Si $h/R \leq 1$ : on considère une semelle fictive constituée par le tiers le plus chargé de la fondation et l'on calcule sa contrainte admissible $q'_a$ que l'on compare à $P$ .	-la résistance en pointe : calculée comme dans le cas des fondations superficielles, avec le facteur de portance $K$ tiré des abaques Ménard  - le frottement latéral $S$ : $Q = Q_p + Q_f$ ( $S_1, S_2$ )	$W = \frac{1.33}{3E} P R_0 \left\{ \lambda_2 \frac{R}{R_0} \right\}^a + \frac{a}{4.5E} P \lambda_3 R$ .  -Cas de la bicouche $W = \int_0^h \frac{\alpha_z \sigma_z}{E_z} \beta dz$

CHAPITRE IV  
CHAPITRE IV

**METHODES DE  
REPRESENTATION  
DE LA  
CONNAISSANCE  
ET APPLICATION  
A KAPPA-PC**

IV-1- INTRODUCTION :

La représentation de la connaissance est le problème clé de l'intelligence artificielle. Il s'agit de chercher un moyen pour exprimer de façon modulaire un ensemble de connaissances. Le transfert de la connaissance sous sa forme externe vers un ordinateur passe avant tout par la phase de représentation de la connaissance. Dans cette étape il va y avoir une structuration du savoir faire de telle sorte qu'il soit compris par la machine. La représentation de la connaissance est une discipline proche des sciences humaines telles que la linguistique et la psychologie cognitive. La connaissance se trouve chez l'expert sous forme de paroles ou d'écrits. C'est une connaissance externe de type 1. Le cogniticien reçoit cette connaissance de l'expert et essaie de la modéliser. (cf. Figure IV-1) [11]

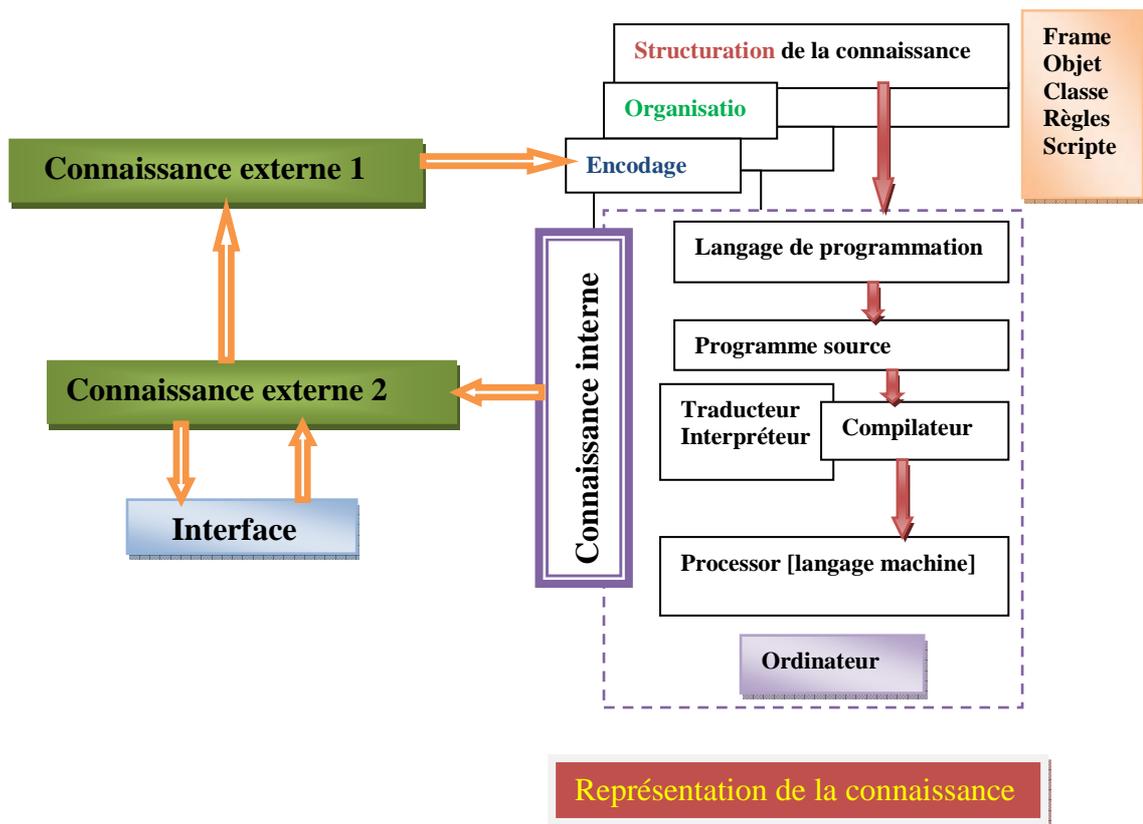


Figure IV-1 : Représentation de la connaissance. [11]

Avant d'entamer la tâche de modélisation il faut bien définir le but à atteindre et le modèle de représentation qui semble adéquat. Après avoir choisi le modèle de représentation, le cogniticien encode le savoir faire en une connaissance interne. Cette dernière maintenant sera comprise par le système. Ce dernier entre en dialogue avec l'utilisateur et donnera sous forme de rapport la solution du problème. C'est la connaissance externe 2. [11]

**IV-2-LES MODES DE REPRESENTATION DE LA CONNAISSANCE :**

En général il y a pour chaque domaine une méthode traditionnelle pour formaliser la connaissance. On donne par exemple le domaine du génie civil où un projet se réalise selon un dossier technique. Dans ce dossier on trouve des plans d'architecture, des plans de génie civil etc. Les ingénieurs et les techniciens comprennent bien ce que signifie chaque plan et pourtant c'est un simple dessin. On a dans ce cas une représentation de la connaissance par un dessin normalisé, qui est une façon de représenter la connaissance. Il y a d'autres exemples tels que les plaques de signalisation sur les routes, les cartes géographiques... Il y a toujours une représentation de la connaissance, mais on remarque bien que cette représentation est dédiée à l'homme et non pas à une machine "ordinateur". [15]

En informatique les choses diffèrent. Il y a une représentation mais il faut qu'elle soit comprise par la machine. C'est à dire qu'il faut modéliser la connaissance selon un schéma et une structure liés directement à l'ordinateur disponible, à la nature du problème et au langage de programmation envisageable. Dans le tableau IV-1, on montre les différents types de connaissance et le mode de représentation correspondant. [11]

Tableau IV-1 : Les différents modes de représentation de la connaissance. [11]

Connaissance	Mode de représentation
<b>Opératoire</b>	Règles Stratégie Agenda procédure Script
<b>Déclarative</b>	Concept Objet
<b>Structuration des connaissances</b>	Graphe de règles Relation entre concepts Réseau Sémantique Relation entre concepts et objets Frame.

Les modes de représentation de la connaissance pour les S.E peuvent être classés en deux sous groupes.

**Groupe 1** : formalisme basé sur des fondements mathématiques utilisant généralement :

- La logique des prédicats
- Les règles de production

**Groupe 2** : représentations structurées basées sur :

- Des objets structurés (représentation des connaissances par objets).
- Les réseaux sémantiques.

---

**IV-3- LES OBJETS ET LES CLASSES D'OBJETS :**

Nous donnons plus de détail sur la représentation structurée par objet et par classe d'objets car c'est le mode de représentation adopté dans ce travail.

**a) L'objet :**

Un objet est un élément décrit par des attributs. A chaque attribut on peut attacher une ou plusieurs valeurs ainsi qu'une méthode. Cette dernière correspond au comportement et traitement que peut accomplir l'objet. Chaque objet est identifié par un nom ou identificateur. [11]

Objet = identité + Attribut(s) + Valeur(s) + Méthode(s)

- **Les attributs** (on parle parfois de propriétés) : Il s'agit des données caractérisant l'objet. Ce sont des variables stockant des informations d'état de l'objet. [11]
  
- **Les facettes** sont les entités qui décrivent l'attribut, il y a au moins une facette pour un attribut. Les facettes peuvent être des procédures ou des faits attachés aux attributs. [15]
  
- **Les méthodes** (appelées parfois fonctions membres) : Les méthodes d'un objet caractérisent son comportement, c'est-à-dire l'ensemble des actions (appelées opérations) que l'objet est à même de réaliser. Ces opérations permettent de faire réagir l'objet aux sollicitations extérieures (ou d'agir sur les autres objets). De plus, les opérations sont étroitement liées aux attributs, car leurs actions peuvent dépendre des valeurs des attributs, ou bien les modifier. [15]
  
- **L'identité** : L'objet possède une identité, qui permet de le distinguer des autres objets, indépendamment de son état. On construit généralement cette identité grâce à un identifiant découlant naturellement du problème (par exemple un produit pourra être repéré par un code, une voiture par un numéro de série, ...). [15]
  
- L'ensemble des **valeurs** des attributs d'un objet constituent son état.

**b) La classe :**

On peut représenter une structure d'objet connue sous forme d'arbre, dont la racine est le premier nœud, représente le nom de la classe mère. Les autres nœuds forment trois niveaux. [11]

- Le premier niveau est celui des attributs (slot)
- Le deuxième niveau est celui des facettes.
- Le troisième niveau est celui des valeurs.

Ces trois niveaux sont généralement liés entre eux par les relations suivantes :

- "A kind of",
- "Is a",
- "A part of".

La relation "**a kind of**" lie une classe à une autre plus générale. Elle génère des sous classes. Ces dernières héritent de leur classe mère : c'est la notion d'héritage dans les classes. [15]

Une classe définit un jeu d'objets dotés de caractéristiques communes. Une classe est un moule d'objet, elle décrit les attributs et les méthodes de toute une famille d'objets. Une classe définit en particulier un type d'objet. Les objets d'une même classe auront des attributs de même type, mais avec des valeurs différentes. Une classe est la description générale d'une famille d'objet et un objet est une instance de classe.

Exemple : On peut regrouper les semelles et ceci, quelque soit leur type dans une classe nommée fondations superficielles. En effet chaque semelle peut se caractériser par le même type d'informations (profondeur d'encastrement, dimensions, etc.) [15]

On peut dire qu'une classe est un moule pour la création d'objet. Chaque objet créé avec ce moule est une instance de la classe, c'est le résultat du moulage d'une classe.

Tout ce qui a été défini dans la classe sera redéfini dans une instance par héritage automatique.

Dans le cas où la classe "moule" est définie, on peut créer autant de moulage "instance" que l'on veut. [15]

**c) L'instance** : En programmation orientée objet, on appelle **instance** d'une classe, un objet avec un comportement correspondant à cette classe et un état initial. L'instance hérite sa structuration (propriétés, méthodes et valeurs) de la classe. Ainsi on ne peut pas demander à une instance - dans un programme - de répondre à un message qui n'est pas autorisé par sa classe. [11]

**Classe : C'est un moule**  
**C'est un patron**  
**C'est plusieurs objets de même type**

**Instance : objet obéissant a un patron.**  
**C'est un moulage**

En résumé, on peut donner les définitions ci-dessous :

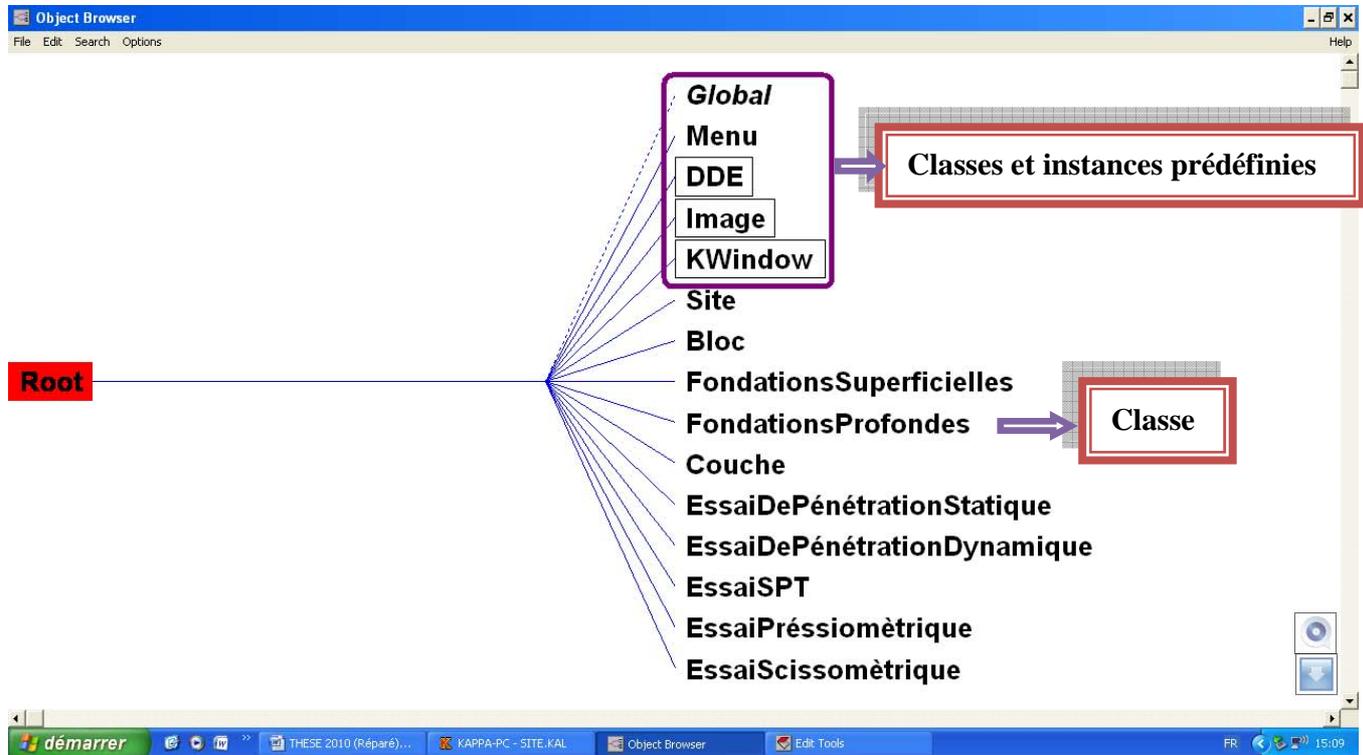
Une classe est donc un outil descriptif utilisé pour définir un jeu d'attributs ou de méthodes caractérisant tout membre (objet) de la classe. Une classe se caractérise par la structure de ses membres, ainsi que les propriétés et les méthodes qui leur sont associées.

La définition des classes en programmation orientée objet est comparable à celle des types dans les langages traditionnels tels que le C et le Pascal. [15]

**Exemple**, si l'on considère que *Homme* (au sens être humain) est une classe, qui prend comme attributs (nom, taille, couleur des cheveux,...) la personne Asmaa Mechkarini est une instance de la classe Homme.

## IV-4-LES CLASSES ET OBJETS DANS KAPPA. PC :

Ayant utilisé le Shell Kappa. PC pour créer notre système expert nous présentons ici les principes relatifs aux objets et classes dans Kappa. PC. (cf figure IV-2).

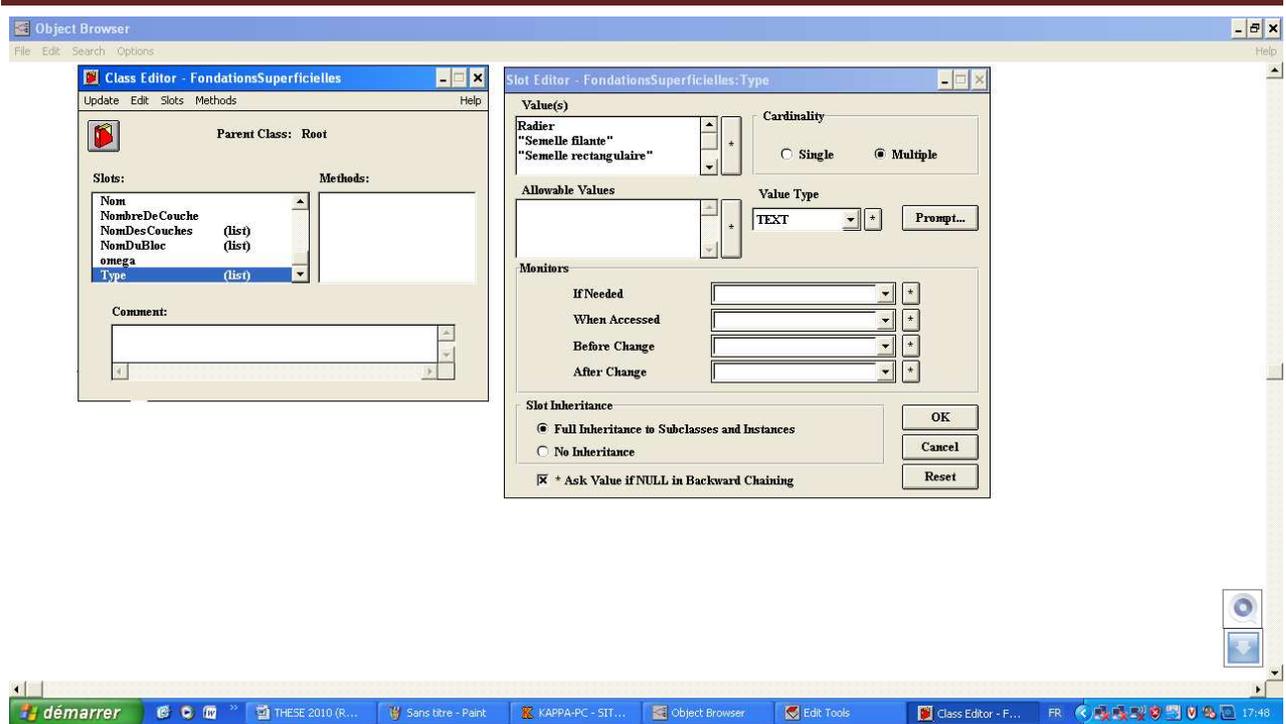


**Figure IV-2 :** Graphe d'héritage des classes et objets du système expert développé

Dans la figure IV-2 Les lignes continues symbolisent une classe qui peut être créée soit :

- Par l'interface utilisateur.
- Par une règle.
- Par des fonctions écrites dans le langage KAL propre à Kappa Pc.

Chaque classe possède des attributs (ou slot). Un attribut possède lui-même un certain nombre de caractéristiques nommées "facettes". L'attribut sera créé à l'intérieur d'une classe soit par un programme, une base de règle, ou via l'éditeur d'attributs de Kappa PC. Pour notre SE tous les attributs d'une classe ainsi que leurs facettes sont créés via ce dernier [13] (cf figure IV-3).



**Figure IV-3 :** Editeur de la classe d'objet **FondationsSuperficielles** et de l'attribut **Type**.

Sur la figure IV-3. La fenêtre de gauche représente l'éditeur de classe qui affiche dans : "Class Editor-FondationsSuperficielles" la classe **FondationssSuperficielle** avec ses attributs ou slots (Nom ,ExcentricitéDeLaCharge, InclinaisonDeLaCharge,Largeur). Les valeurs de l'attribut **Type** (SemelleFilante, SemelleContinue...) sont indiquées dans la case Value(s).

# CHAPITRE V

---

## **REPRESENTATION ET STRUCTURATION DES CONNAISSANCES POUR L'INTERPRETATION DES ESSAIS GEOTECHNIQUES IN SITU**

---

**V-1- INTRODUCTION :**

L'analyse du savoir faire en matière d'interprétation des résultats des essais géotechniques in situ, est la première étape du processus de conception de notre système expert. A partir de celle-ci nous allons pouvoir choisir un mode de représentation de cette expertise. Pour cela nous avons choisi de structurer la base de connaissance avec des objets et des classes. Des règles de production permettent aussi de formaliser les connaissances opératoires.

**V-2- HYPOTHESES ET LIMITES DE FONCTIONNEMENT DE NOTRE SE :**

- ❖ Les essais géotechniques in situ doivent être réalisés selon une norme précisée dans l'attribut « **Norme** » de chaque instance d'objet relatif à la description d'un type d'essai.
- ❖ Les résultats des essais géotechniques in situ sont considérés fiables.
- ❖ Les angles d'inclinaison de la base de la fondation, et de la charge, sont limités à 20° au maximum.
- ❖ L'angle du talus est au plus égal à 20°.
- ❖ Pour faciliter notre étude nous avons limité le nombre d'essais de pénétration statique à quatre par bloc.
- ❖ Toutes les charges transmises au sol sont supposées statiques.
- ❖ Le sol est supposé présenter partout la même stratification sous un même bloc.
- ❖ Sous un même bloc, la variation de l'épaisseur d'une couche du sol est supposée nulle.
- ❖ Les fondations superficielles sous un bloc sont supposées être implantées dans la même couche.
- ❖ Nous avons pris des coefficients de correction pour le calcul de la portance des fondations superficielles correspondant uniquement à des sols dont l'angle de frottement est supérieur à 25°.
- ❖ Toutes les fondations d'un bloc ont le même angle d'inclinaison.
- ❖ Nous appliquons les mêmes coefficients de correction à toutes les fondations d'un même bloc
- ❖ Les fondations sous un même bloc sont du même type ;
- ❖ Les tassements sont considérés vérifiés ;
- ❖ L'excentricité de la charge est supposée égale à 0.

***Remarque :***

*Compte tenu de la faisabilité du Système Expert en géotechnique, notre base de règles est établie seulement sur l'estimation de la capacité portante des fondations superficielles à partir de l'essai de pénétration statique.*

---

**V-3- LA REPRESENTATION DE LA CONNAISSANCE DANS NOTRE SE :**

Compte tenu du nombre très élevé de concepts et d'informations utilisés en géotechniques nous avons préféré structurer notre base de connaissance avec des classes d'objets. Des règles de production sont aussi prévues afin de décrire les opérations sur ces objets.

La représentation de la connaissance dans notre système expert s'appuie sur le générateur de systèmes à base de connaissance KAPPA-PC d'IntelliCorp, car ce générateur utilise à la fois des objets avec classes à héritage simple et des règles de production manipulant les valeurs des attributs d'objets. Ayant choisi le Shell Kappa-Pc à cause de la possibilité d'utiliser les règles et les classes d'objet, l'objectif de notre travail est à présent de regrouper dans des objets et classes d'objets tout ce qui est en relation avec l'estimation de la capacité portante d'un sol en vu d'implantation des fondations superficielles. Les objets et leurs attributs seront définis de telle sorte qu'ils donnent au système le caractère d'extensibilité et de modifiabilité.

Les classes que nous avons définies pour notre système sont les suivantes :

- ❖ Site.
- ❖ Bloc.
- ❖ FondationsSuperficielles.
- ❖ FondationsProfondes.
- ❖ Couches.
- ❖ EssaiDePénétrationStatique.
- ❖ EssaiSPT.
- ❖ EssaiDePénétrationDynamique.
- ❖ EssaiPressiométrique.
- ❖ EssaiScissométrique.

Ces classes englobent toutes les informations nécessaires pour l'estimation de la capacité portante d'un sol de fondations superficielles. Elles assurent une représentation de la connaissance dans le but de pouvoir analyser les résultats d'un essai géotechnique in situ. Les attributs de chaque classe sont conçus en vue d'assurer la disponibilité des informations durant les démarches de l'estimation de la portance d'un sol. Par exemple l'objet **Site**, contient comme attribut « **AngleDuTalus** », car dans le cas du calcul de la capacité portante d'un terrain en pente, connaître l'angle du talus permet d'affecter des coefficients de correction à la portance calculée en considérant le sol horizontal.

Les instanciations des objets permettent de créer une base de faits constituée des instances introduites par l'utilisateur ou déduites par le système. Les valeurs de chaque attribut d'instances d'objets peuvent être utilisées éventuellement durant les inférences du système expert.

V-4- SCHEMA CONCEPTUEL DES CLASSES ET OBJETS DE NOTRE SYSTEME EXPERT

Avant de passer à la description détaillée des principales classes d'objets, nous avons estimé utile de présenter un schéma général d'organisation des objets et classes de notre système expert décrit par la figure V-1.

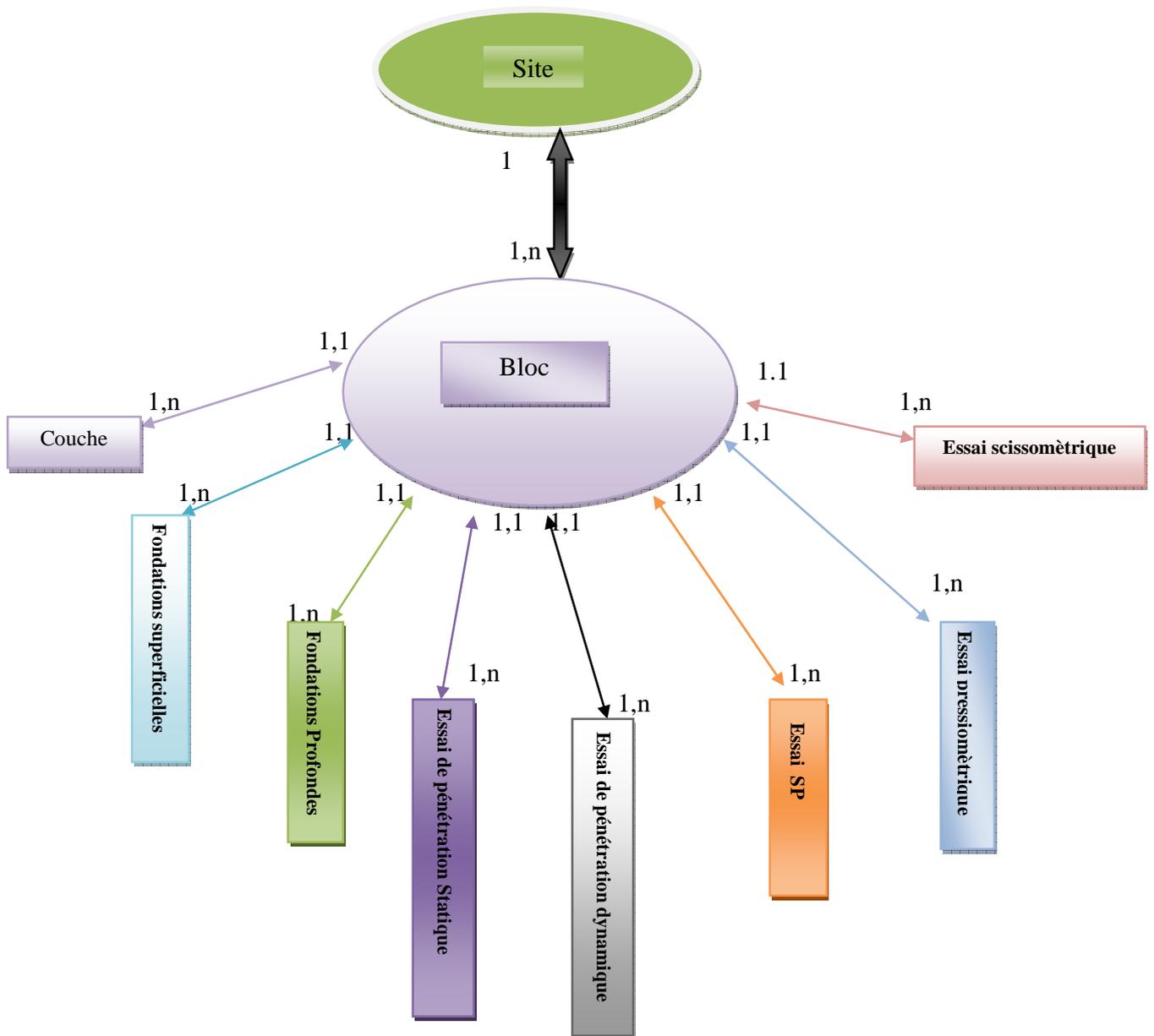


Figure V-1 : schéma conceptuel de la base d'objets de notre SE.

Sur un site sont implantés 1 à n blocs (bâtiments) .Dans chaque instance de site on retrouve un attribut donnant la liste des noms de blocs qui lui sont attachés. Dans chaque instance de bloc est précisé le nom du site ou il est implanté.

Avant toute implantation des fondations, un ou plusieurs essais géotechniques in situ, (essai de pénétration statique, essai de pénétration dynamique...) doivent être réalisés pour l'estimation de la portance des fondations d'un bloc. Chaque bloc est donc lié à « n » essais de chaque type.

La stabilité d'un bloc est assurée par le biais de fondations superficielles ou profondes. Ces fondations doivent être implantées dans des couches de sol assez résistantes, pour supporter toutes les charges qui leurs sont transmises par le bloc. Pour répondre à cet objectif, l'objet **Bloc** est lié à « n » instances d'objets : fondations superficielles, fondations profondes, couche, essai de pénétration statique, essai de pénétration dynamique, essai SPT, essai scissométrique et essai pressiométrique.

### V-5-DESCRIPTION DE LA CLASSE D'OBJET Site :

Toutes les informations concernant le site dans sa globalité sont stockées dans cette classe d'objet. La classe d'Objet **Site** permet de décrire le terrain, tel que le nom du site, la superficie, l'angle du talus, le type du projet, le nom du projet, etc. Le tableau V-1 donne le détail des attributs ainsi que leurs valeurs possibles, leurs types et les méthodes qui leurs sont rattachées.

Afin de définir ses coordonnées géographiques Nous avons considéré qu'un site s'inscrit dans le plan au sein d'un rectangle défini par deux points (cf figure V-2). Le premier point a ses coordonnées (x,y) définies par les deux attributs :

- **CoordonnéeDuPremier X1 ;**
- **CoordonnéeDuPremierPointY1.**

Le deuxième point est défini par les attributs :

- **CoordonnéeDu DeuxièmePoint X2 ;**
- **CoordonnéeDuDeuxièmePointY2.**

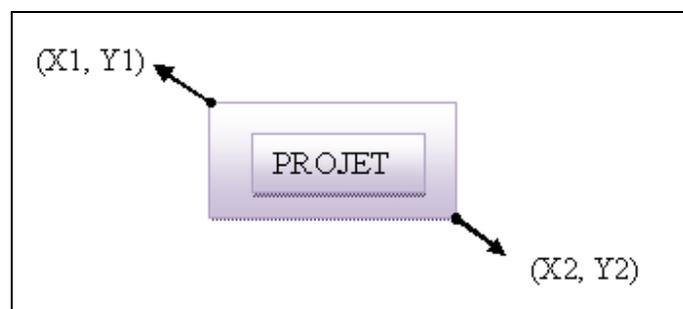


Figure V-2 : délimitation du projet et illustration de ses deux points représentatifs.

Tableau V-1 : Description des attributs de la classe d'objets **Site** .

CLASSE	ATTRIBUTS	VALEUR(S)	TYPE(S)	METHODE(S)
	Nom		Texte	
	AngleDuTalus		Nombre	
	Largeur		Nombre	
	Longueur		Nombre	
	Superficie		Nombre	
	EtudesPréalables	Oui Non	Texte Texte	
	TypeDuProjet	Bâtiment Ecole Mosquée Villa Hôtel	Texte Texte Texte Texte Texte	
	NomDuProjet		Texte	
	NombreDeBlocsDuProjet		Nombre	
	NomDesBlocsDuProjet		ListeTexte	
	CoordonnéPremierPointDuProjetX1		Nombre	
	CoordonnéPremierPointDuProjetY1		Nombre	
	CoordonnéDeuxièmePoinDuProjetX2		Nombre	
	CoordonnéDeuxièmePoinDuProjetY2		Nombre	
	NombreDEssaiPénéroStatique		Nombre	
	NomDEssaisPénéroStatique		ListeTexte	
	NomDEssaiPénéroDynamique		ListeTexte	
	NombreDessaiPénéroDynamique		Nombre	
	NombreDessaiPressiométrique		Nombre	
	NomDessaiPressiométrique		ListeTexte	
	NombreDessaiSPT		Nombre	
	NomDesEssaisSPT		ListeTexte	
	NombreDessaiScissométrique		ListeNombre	
	NomDesEssaisScissométrique		ListeTexte	
	NombreDeSondages		Nombre	
	Nom DesSondages		ListeTexte	
	Commune		Texte	
	Daïra		Texte	
	Wilaya		Texte	

Parmi les attributs de la classe d'objet **Site** on relève les attributs « **NomDEssaisPénéroStatique** », « **NombreDEssaiPénéroStatique** ». Ils permettent de préciser le nombre et les noms des objets décrivant les essais au pénétromètre statique effectués au niveau du bloc considéré. La même chose a été faite pour les autres types d'essais in situ.

Comme il arrive que l'on soit obligé de fonder sur un terrain en pente, l'attribut « **AngleDuTalus** », permet de préciser l'angle du talus en degré. Ceci servira à choisir le coefficient de correction correspondant par lequel il faut multiplier la capacité portante du sol lorsque l'angle du talus est supérieur à 0°.

**V-6-DESCRIPTION DE LA CLASSE D'OBJET Bloc :**

Un projet peut comporter un ou plusieurs blocs. Chaque bloc peut être différent des autres blocs par sa superficie, sa nature, la valeur de la charge qu'il transmet au sol, la profondeur souhaitée pour l'implantation des fondations, le type de ces dernières... Le tableau V-2 décrit la classe « **Bloc** ». On y trouve la liste de tous ses attributs avec leurs types et leurs valeurs possibles éventuelles.

Nous avons considéré qu'un bloc s'inscrit dans le plan au sein d'un rectangle défini par deux points (cf figure V-2). Le premier point a ses coordonnées (x,y) définies par les deux attributs :

- **CoordonnéeDuPremier X3 ;**
- **CoordonnéeDuPremierPointY3.**

Le deuxième point est défini par les attributs :

- **CoordonnéeDu DeuxièmePoint X4 ;**
- **CoordonnéeDuDeuxièmePointY4.**

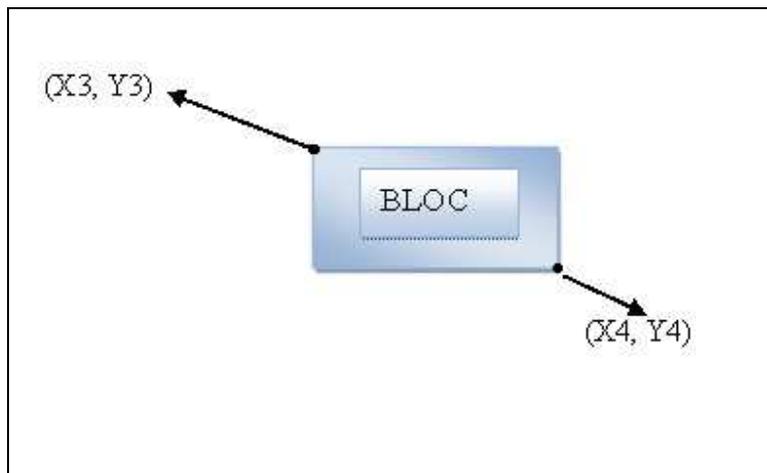


Figure V-3 : délimitation du bloc et illustration de ses deux points représentatifs.

Les attributs de la classe d'objet **Bloc** jouent un rôle important dans l'estimation de la portance du sol. L'attribut « **Rm** », est le résultat du calcul de la résistance de pointe moyenne des différents essais de pénétration statique concernant le bloc, à la profondeur d'implantation des fondations superficielles. L'attribut « **NombreDessai PénétrationStatique** », permet de préciser le nombre d'essai de pénétration statique réalisé pour un bloc.

Tableau V-2 : Description des attributs de la classe d'objets **Bloc**.

CLASSE	ATTRIBUT(S)	VALEUR(S)	TYPE(S)	METHODE(S)
	Nom		Texte	
	Usage	Logement Administratif Scolaire Industriel	Texte Texte Texte Texte	
	Superficie		Nombre	
	IntensitéDeLaCharge		Nombre	
	CoordonnéeDuPremier X3		Nombre	
	CoordonnéeDuPremierPoint Y3		Nombre	
	CoordonnéeDu DeuxièmePoint X4		Nombre	
	CoordonnéeDuDeuxièmePoint Y4		Nombre	
	ProfondeurImplantatioFondationP		Nombre	
	NombreDessai PénétroStatique		Nombre	
	NomDesEssaiPénétroStatique		Liste texte	
	CoucheDImplantation	"Purement Cohérente" "CraieMarneMarno-Calcaire" SableEtGraveB SableA ArgileEtLimonABC SableEtGraveC	Texte	
	NomCoucheDImplantation		Texte	
	FiCoucheDImplantation		Nombre	
	ProfondeurImplantatioFondationP		Nombre	
	NumeroCoucheImplantation		Nombre	
	Rm		Nombre	
	NomDesEssaisPénétroDynamique		Liste Texte	
	NombreDEssaiPénétroDynamique		Nombre	
	NombreDEssaiPressiométrique		Nombre	
	NomdesEssaisPressiométrique		Liste Texte	
	Nombre D'essai SPT		Nombre	
	Nomdes Essais SPT		Liste Texte	
	NombreDessai Scissométrique		Nombre	
	NomdesEssaiScissométrique		Liste Texte	
	NombreDeSondages		Nombre	
	NomDesSondages		Liste Texte	
	qaDTU		Nombre	
	qaHerminier		Nombre	
	qaMeyerhof		Nombre	
	qaSanglerat		Nombre	
	CuCoucheDImplantation		Nombre	
	Kc		Nombre	
	NomDuSite		Texte	

L'attribut « **NomDesEssaiPénétrationStatique** » est une liste des noms des essais de pénétration statique réalisés pour le bloc. Pour les autres types d'essai on a aussi le nombre et la liste des noms des essais liés au bloc.

Afin de pouvoir préciser le nom et le type du sol de la couche d'implantation nous avons prévu l'attribut « **CoucheDImplantation** » qui peut prendre comme valeurs : « **PurementCohérente** », « **CraieMarneMarno-Calcaire** », « **SableEtGraveB** », « **SableA** », « **ArgileEtLimonABC** » et « **SableEtGraveC** » ; cette information servira à déterminer le coefficient de portance  $K_c$ .

Les attributs « **qaDTU** », « **qaHerminier** », « **qaMeyerhof** » et « **qaSanglerat** » contiennent les résultats de l'estimation de la portance du sol par le SE respectivement suivant la méthode de DTU 13-12, celle de l'Herminier, celle de Meyerhof, et celle de Sanglerat.

L'attribut « **Kc** » représente le coefficient de portance du sol.

L'attribut « **ProfondeurImplantationFondationP** » représente profondeur  $P$  prévue pour l'implantation des fondations.

L'attribut « **FiCoucheDImplantation** » représente Angle du frottement interne de la couche d'implantation  $\varphi$ .

L'attribut « **NumeroCoucheImplantation** » représente Numéros de la couche d'implantation.

### V-7-DESCRIPTION DE LA CLASSE D'OBJET FondationsSuperficielles :

Le tableau V-3, englobe les attributs, et leurs valeurs possibles pour la classe d'objet **FondationsSuperficielles**. Une fondation est toujours définie par les attributs **Nom**, **Coordonnées(x,y,z)** d'implantation, largeur **B**, longueur **L**, fiche **D**, profondeur d'encastrement **De** dans la couche porteuse et par la distance **d** qui la sépare de l'angle du talus lorsque celui ci existe.

Parmi les attributs de la classe d'objet « **FondationsSuperficielles** » on relèvera aussi le "type" qui peut prendre comme valeurs possibles « **Radier** », « **Semelle filante** », « **Semelle rectangulaire** », « **Semelle carrée** » et « **Semelle circulaire** ».

L'attribut « **InclinaisonDelabase** », est l'angle de l'inclinaison de la base de la fondation.

L'attribut « **CoefficientDeCorrection** », est calculé par des règles du SE à partir de l'angle de l'inclinaison de la charge, de celui du talus, de l'excentricité de la charge, et de l'inclinaison de la base. La conjugaison de ces deux attributs permettra de déclencher des règles simples qui lient l'angle de l'inclinaison au coefficient de correction correspondant.

L'attribut « **FacteurDeSécurité** » contient la valeur de ce facteur qui est défini par l'utilisateur.

L'attribut « **h1** » représente la distance qui sépare la base de la fondation superficielle et la première couche sous-jacente dans le cas d'un sol stratifié.

L'attribut « **CoucheDImplantation** », qui peut prendre comme valeurs « **Couche 1** », « **Couche 2** » et « **Couche 3** » indique la localisation de la couche d'implantation par rapport à la stratification du sol à partir de la surface libre du sol.

La classe d'objet **FondationsSuperficielles** est liée à la classe d'objet **Bloc** par l'attribut « **NomDuBloc** ». Ce dernier contient le nom du bloc sous le quelle elle se situe.

La classe d'objet **FondationsSuperficielles** est liée à la classe d'objet **Couche** par l'attribut « **NomDesCouches** ».

Tableau V-3 : Description des attributs de la classe d'objets **FondationsSuperficielles** .

CLASSES	ATTRIBUTS	VALEURS	TYPES	METHODES
	Nom		Texte	
	NomDuBloc		Texte	
	Type	Radier SemelleFilante SemelleRectangulaire SemelleCarrée SemelleCirculaire	Liste Texte	
	B		Nombre	
	L		Nombre	
	Coordonnée X		Nombre	
	Coordonnée Y		Nombre	
	Coordonnée Z		Nombre	
	InclinaisonDeLaBase		Nombre	
	CoefficientDeCorrection		Nombre	
	D		Nombre	
	ExcentricitéDeLaCharge		Nombre	
	InclinaisonDeLaCharge		Nombre	
	NombreDeCouche		Nombre	
	d		Nombre	
	De		Nombre	
	FacteurDeSécurité		Nombre	
	NomDesCouches		ListeTexte	
	CoucheDImplantation	Couche 1 Couche 2 Couche 3	Texte	
	h1		Nombre	

V-8-DESCRIPTION DE LA CLASSE D'OBJET **Couche** :

L'objet **Couche** regroupe tout ce qui est relatif à une couche du sol tels que : L'angle de frottement interne, densité du sol, teneur en eau etc. Le tableau V-4 décrit les attributs de la classe d'objet **Couche**, ainsi que leurs valeurs possibles et leurs types.

Tableau V-4 : Description des attributs de la classe d'objets **Couche**.

CLASSE	ATTRIBUTS	VALEURS	TYPES	METHODES
	Nom		Texte	
	Numéros	1, 2, 3	Liste de Nombre	
	Poids Volumique Apparent Humide		Nombre	
	Poids Volumique Sec		Nombre	
	Poids Volumique Des Grains Solides		Nombre	
	Poids Volumique Du Sol Saturé		Nombre	
	Poids Volumique De L'Eau		Nombre	
	Poids Volumique Déjaugé		Nombre	
	Teneur En Eau		Nombre	
	Teneur En Eau De Saturation		Nombre	
	Densité Du Sol		Nombre	
	Densité Sèche Du Sol		Nombre	
	Densité Humide Du Sol		Nombre	
	Degré De Saturation		Nombre	
	Fi		Nombre	
	Fiu		Nombre	
	Contrainte Du Sol Au Repos		Nombre	
	Epaisseur		Nombre	
	Zmax		Nombre	
	Zmin		Nombre	
	Nature du sol		Texte	
	Cu		Nombre	
	C		Nombre	
	Nom De Bloc		Liste Texte	

Nous avons prévu comme attributs pour la classe d'objet **Couche** les caractéristiques du sol suivantes :

« **Poids Volumique Apparent Humide** » :  $\gamma_h$

« **Poids Volumique Sec** » :  $\gamma_d$

« **Poids Volumique Des Grains Solides** » :  $\gamma_s$

« **Poids Volumique Du Sol Saturé** » :  $\gamma_{sat}$

« **Poids Volumique De L'Eau** » :  $\gamma_w$

« **Poids Volumique Déjaugé** » :  $\gamma'$

« **Teneur En Eau** » :  $\omega$

« **Teneur En Eau De Saturation** » :  $\omega_{sat}$

« **Densité Du Sol** » :  $d_s$

« **Densité Sèche Du Sol** » :  $d_d$

« **DensitéHumideDuSol** » :  $d_h$

« **DegréDeSaturation** » :  $S_r$

« **Fi** » : Angle du frottement interne  $\varphi$ .

« **Fiu** » : Angle du frottement interne  $\varphi_u$  pour un sol non consolidé non drainé.

« **ContrainteDuSolAuRepos** » :  $\sigma_{v0}$

La classe d'objet **Couche** est liée à la classe d'objet **Bloc** par l'attribut « **NomDuBloc** ». Ce dernier contient les noms des blocs sous les quels elle se situe.

### V-9-CLASSE D'OBJET **EssaiDePénétrationStatique** :

Les attributs, leurs valeurs, leurs types et leurs méthodes appropriées sont regroupés dans le tableau V-5. Mentionner le nom et le type de l'appareil pénétrométrique utilisé dans une investigation, permet de comparer les résultats des différents essais pénétrométriques avec les différents pénétromètres, dans le cas où ils sont réalisés sur le même site. De plus l'estimation de la portance se fait en fonction du matériel utilisé. Nous utilisons aussi l'attribut « **TypeDePointe** » qui prend comme valeurs « **Double** », « **Simple** », « **Gouda** » et « **SolEssais** ».

On a associé à chaque point d'essai 15 valeurs de résistances de pointe. Ces valeurs sont réparties à raison de 5 par couche de sol, sachant qu'il y a au plus 3 couches. Un nombre qui nous semble suffisant pour le calcul de la capacité portante du sol, en vue de l'implantation des fondations superficielles ou profondes. Ces résistances de pointe sont notées  $R_{pijk}$  avec « i » numéros de l'essai, « j » numéros de la couche et « k » numéros de la résistance de pointe. Par exemple l'attribut « **Rp134** » représente la quatrième résistance de pointe du premier essai pour la troisième couche de sol.

Parmi les attributs de l'objet « **EssaiDePénétrationStatique** » il convient de noter l'attribut « **NombreDeCouches** » qui prend comme valeurs possible « 1 », « 2 », et « 3 ». Il correspond en fait à la détermination du nombre de couches donné par l'essai. De plus, un attribut « **StratificationConfirméeParSondage** » qui prend comme valeurs possibles « **Oui**, **Non**, **LeSondageN'EstPasRéalisé** » permet de l'indiquer si la stratification est confirmée par un sondage réalisé à l'extrémité immédiate du point d'essai.

**RpALaProfondeurDImplantation** : Résistance de pointe à la profondeur de l'implantation des fondations superficielles.

**RpA0.5BDeLaProfDImplantation** : Résistance de pointe à 0.5B sous la base de la fondation superficielle (B : largeur de la fondation).

**RpA1BDeLaProfDImplantation** : Résistance de pointe à 1B sous la base de la fondation superficielle

**RpA1.5BDeLaProfDImplantation** : Résistance de pointe à 1.5B sous la base de la fondation superficielle.

**RpmCorrigée** : Résistance de pointe moyenne pour un essai de pénétration statique (déduite par le système) à 1.5 B de la profondeur d'implantation de fondation superficielle.

**qaDTU1** : la portance du sol estimée à partir d'un seul essai de pénétration statique, calculée selon les règles relatives au DTU 13-12.

Tableau V-5 : Description des attributs de la classe d'objet **EssaiDePénétrationStatique** .

CLASSES	ATTRIBUTS	VALLEURS	TYPES	METHODES
	Nom			
	Nom de l'appareil	Gouda 2.5t Gouda 10t Gouda 17.5t Gouda 20t Meurisse Jangot-Bonneton Parez Fondasol C.E.B.T.P L.P.C de St-Brieuc Andina	Texte	
	Type d'appareil	Cône mobile Cône fixe	Texte	
	Norme	Algérienne Française ASTM	Texte	
	Nom du Bloc		Texte	
	Nombre de couches	1 2 3	Nombre	
	Profondeur D' Investigation		Nombre	
	Stratification confirmée par carte géologique	Oui Non Carte géologique pas disponible	Texte	
	Stratification confirmée par sondage	Oui Non Le sondage n'est pas réalisé	Texte	
	Niveau De La Nappe		Nombre	
	Type De Pointe	Double Simple Gouda Sol essais	Texte	
	Lectures Continues	Oui Non	Liste Texte	
	DistanceEntreDeuxLectures Consécutives		Nombre	
	Angle De Pointe		Nombre	
	Section Droite De La Pointe		Nombre	
	Diamètre De La Pointe		Nombre	
	Vitesse De Pénétration		Nombre	
	Rp111		Nombre	
	Rp112		Nombre	
	Rp113		Nombre	
	Rp114		Nombre	
	Rp115		Nombre	
	RpALaProfondeurDImplantation		Nombre	
	Rp121		Nombre	
	Rp122		Nombre	
	Rp123		Nombre	
	Rp124		Nombre	
	Rp125		Nombre	
	Rp131		Nombre	
	Rp132		Nombre	
	Rp133		Nombre	
	Rp134		Nombre	
	Rp135		Nombre	
	RpA0.5BDeLaProfDImplantation		Nombre	
	RpA1.5BDeLaProfDImplantation		Nombre	
	RpA1BDeLaProfDImplantation		Nombre	
	RpmCorrigée		Nombre	
	qaDTU1		Nombre	

**V-10- REGLES DE PRODUCTION DANS KAPPA-PC :**

Comme il a été signalé au chapitre étude théorique des systèmes experts, la règle est une entité importante dans le raisonnement du système. Elle permet de décrire au sein de la base de connaissance toutes les connaissances opératoires susceptibles d'évoluer et donc de changer au cours du temps. Ce sont généralement des connaissances dites heuristiques. Par contre, les connaissances statiques (qui ne changent pas) d'un ou plusieurs experts peuvent être modélisées sous forme d'objet, classe d'objets, voire de méthodes de fonctions ou de procédures en langage KAL. Les règles permettent d'exploiter les connaissances et de les rendre dynamiques au même titre que les fonctions.

**V-10-1- Exemple de Règles :**

La figure V-4 décrit une règle de production écrite dans KAPPA-PC.

Il s'agit de la règle **Herminier1** est l'une des règles destinées au calcul de la capacité portante du sol suivant la méthode de l'Herminier. Elle a comme variables :

- x pour toute instance de la classe d'objets **FondationsSuperficielles**,
- y pour toute instance de la classe d'objets **Bloc**,
- z pour toute instance de la classe d'objets **EssaiDePénétrationStatique**,
- w pour toute instance de la classe d'objets **Couche**,
- s pour toute instance de la classe d'objets **Site**.

Elle peut se traduire comme suit :

Si pour une instance 'z' de la classe d'objet **EssaiDePénétrationStatique** l'attribut « **TypeDePointe** » prend la valeur " Simple".

Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NomCoucheImplantation** » est égale à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'w' de la classe d'objet **Couche** .

Et Si pour une instance 'x' de la classe d'objet **FondationsSuperficielles** l'attribut « **NomDuBloc** » est égale a l'attribut « **Nom** » de l'instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** .

Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NomDuSite** » est égale à l'attribut « **Nom** » de l'instance 's' de la classe d'objet **Site** .

Et Si pour une instance 'z' de la classe d'objet **EssaiDePénétrationStatique** l'attribut « **NomDuBloc** » est égale à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** .

Alors :

Pour l'instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** La capacité portante du sol représentée par l'attribut « **qaHerminier** », est calculée selon la formule :

$$\mathbf{qaHerminier=Rm/10}$$

Où :

**Rm** : est un attribut de l'instance « y » de l'objet **Bloc** (résistance moyenne des essais réalisés pour le bloc).

L'utilisation de la fonction post-message permet de faire afficher à l'écran la valeur de l'attribut « **qaHerminier** » et le nom de l'instance « y » de **Bloc**.

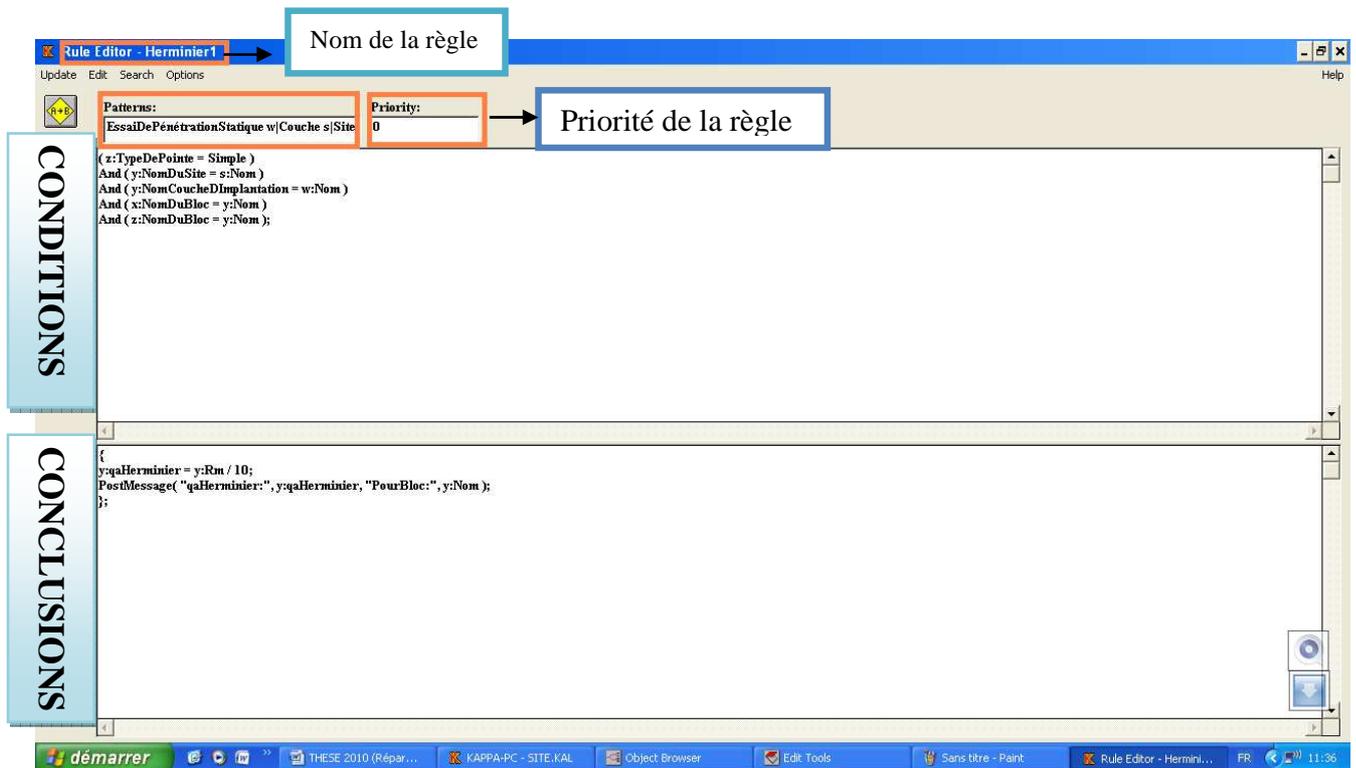


Figure V-4 : Règle Herminier1 écrite sous KAPPA-PC.

#### V-10-2-Les règles dans notre SE :

Les règles dans notre système expert peuvent être classées en cinq paquets comme suit :

- Règles pour le calcul de la portance du sol.
- Règles pour le calcul des coefficients de correction.
- Règles pour le calcul de la résistance moyenne des différents essais de pénétration statique concernant le bloc.
- Règles pour le calcul de la résistance moyenne concernant un seul essai de pénétration statique.
- Règles pour le calcul du coefficient de la portance du sol.

Nous présentons dans ce qui suit une règle de chaque une de ces types, les autres règles sont données en annexes.

**a-Règles pour le calcul de la portance du sol :**

```

/*****
****  RULE: Meyerhof1
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche s|Site,

If
  ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:Bloc= y:Nom ),

Then
{
y:qaMeyerhof = ( ( y:Rm * x:B / 36 ) / ( 1 + x:D / y:ProfondeurDImplantationP ) );
PostMessage( "qaMeyerhof:", y:qaMeyerhof, "PourBloc:", y:Nom );
} ;

```

La règle Meyerhof1 est l'une des règles destinées au calcul de la capacité portante du sol suivant la méthode de Meyerhof. Elle a comme variables :

- x pour toute instance de la classe d'objets **FondationsSuperficielles**,
- y pour toute instance de la classe d'objets **Bloc**,
- z pour toute instance de la classe d'objets **EssaiDePénétrationStatique**,
- w pour toute instance de la classe d'objets **Couche**,
- s pour toute instance de la classe d'objets **Site**.

Elle peut se traduire comme suit :

Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NomCoucheDImplantation** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'w' de l'objet **Couche** .

Et si pour une instance 'x' de la classe d'objet « **FondationsSuperficielles** » l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'y' de l'objet **Bloc** .

Et si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NomDuSite** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 's' de l'objet « **Site** ».

Et Si pour une instance 'z' de la classe d'objet **EssaiDePénétrationStatique** l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'y' de l'objet « **Bloc** »

**ALORS**

Pour l'instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** La capacité portante du sol représentée par l'attribut « **qaMeyerhof** », est calculée selon la formule de Meyerhof :

$$qaMeyerhof = \frac{Rm * B / 36}{1 + De / ProfondeurDImplantationP}$$

Où :

**Rm** : est un attribut de l'instance « y » de l'objet « **Bloc** » (résistance moyenne des essais réalisés pour le bloc).

**B** : est un attribut de l'instance « x » de l'objet **FondationsSuperficielles** (largeur de la fondation).

**De** : est un attribut de l'instance « x » de l'objet **FondationsSuperficielles** (profondeur d'encastrement de la fondation dans la couche porteuse).

« **ProfondeurDImplantationP** » : est un attribut de l'instance « y » de l'objet **Bloc** .

L'utilisation de la fonction post-message permet de faire afficher à l'écran la valeur de l'attribut **qaMeyerhof** et le nom de l'instance « y » de Bloc.

### b-Règles pour le calcul des coefficients de correction :

```

/*****
****  RULE: G1
*****/

```

```
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche s|Site,
```

**If** :

```

( x:InclinaisonDeLaBase = 0 )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge= 0 )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge=0 )
And ( s:AngleDuTalus > 0 )
And ( s:AngleDuTalus <= 5° )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:NomDuBloc= y:Nom )
And (y:FiCoucheDImplantation>= 25° ),

```

Then :

```

{
x:CoefficientDeCorrection = ( -0.05 * s:AngleDuTalus + 1 );
} ;

```

Cette règle a comme variables :

- x pour toute instance de la classe d'objets **FondationsSuperficielles**,
- y pour toute instance de la classe d'objets **Bloc**,
- z pour toute instance de la classe d'objets **EssaiDePénétrationStatique**,
- w pour toute instance de la classe d'objets **Couche**,
- s pour toute instance de la classe d'objets **Site**.

Elle peut se traduire comme suit :

- Si pour une instance 'x' de la classe d'objet **FondationsSuperficielles** l'attribut « **InclinaisonDeLaBase** » est égal à " 0".
- Et si pour une instance 'x' de la classe d'objet **FondationsSuperficielles** l'attribut « **InclinaisonDeLaCarge** » est égal à " 0".
- Et Si pour une instance 'x' de la classe d'objet **FondationsSuperficielles** l'attribut « **ExcentricitéDeLaCarge** » est égal à " 0".
- Et Si pour une instance 's' de la classe d'objet **Site** l'attribut « **AngleDuTalus** » est supérieur à 0.
- Et Si pour une instance 's' de la classe d'objet **Site** l'attribut « **AngleDuTalus** » est inferieur ou égal à " 5°".
- Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NomCoucheDImplantation** » est égal a l'attribut « **Nom** »de l'instance « w » de l'objet **Couche** .
- Et Si pour une instance 'x' de la classe d'objet «**FondationsSuperficielles** » l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** »de l'instance « y » de l'objet **Bloc** .
- Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NomDuSite** » est égal à l'attribut « **Nom** »de l'instance 's' de l'objet **Site** .
- Et Si pour une instance 'z' de la classe d'objet «**EssaiDePénétrationStatique**» l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** »de l'instance « y » de l'objet **Bloc** .
- Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut **FiCoucheDImplantation** est supérieur ou égal à " 25°".

Alors :

- Pour l'instance 'x' de la classe d'objet «**FondationsSuperficielles** » L'attribut **CoefficientDeCorrection** est calculé par la formule :
- $x:\text{CoefficientDeCorrection} = -0.05 * s:\text{AngleDuTalus} + 1.$

**c-Règles pour le calcul de la résistance moyenne des différent essais de pénétration statique concernant un bloc :**

```

/*****
****  RULE: Rm2
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche s|Site,

If
  ( z1:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z2:NomDuBloc= y:Nom )
And ( y:NombreEssaiPénétroStatique = 2 ),

Then
{
y:Rm =((z1:RpALaProfationdeurDImplantation+z2:RpALaProfationdeurDImplantation)/2);
};

```

Cette règle a comme variables :

- x pour toute instance de la classe d'objets **FondationsSuperficielles**,
- y pour toute instance de la classe d'objets **Bloc**,
- z pour toute instance de la classe d'objets **EssaiDePénétrationStatique**,
- w pour toute instance de la classe d'objets **Couche**,
- s pour toute instance de la classe d'objets **Site**.

Elle peut se traduire comme suit :

Si pour l'instance 'z1' de la classe d'objet **EssaiDePénétrationStatique** l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'y' de l'objet **Bloc** .

Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NomDuSite** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 's' de l'objet **Site** .

Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet « **Bloc** », l'attribut « **NomCoucheDImplantation** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'w' de l'objet **Couche** .

Et si pour une instance 'z2' de la classe d'objet **EssaiDePénétrationStatique** l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'y' de l'objet **Bloc** .

Et si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NombreEssaiPénétrationStatique** » prend la valeur 2.

Alors :

Pour l'instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **Rm** » est calculé comme suite :

$$y:Rm = ((z1:RpALaProfondeurDImplantation+z2:RpALaProfondeurDImplantation)/2);$$

Tel que :

**RpALaProfondeurDImplantation** : représente la résistance de pointe du premier essai, réalisé pour le bloc concerné par le calcul.

**RpALaProfondeurDImplantation** : représente la résistance de pointe du deuxième essai réalisé pour le même bloc.

**Rm** : résistance moyenne des différents essais de pénétration statique concernant un bloc.

#### d-Règles pour le calcul de la résistance moyenne concernant un essai de pénétration statique :

```

/*****
****  RULE: DTU1
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche s|Site,

```

**If :**

```

( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:NomDuBloc = y:Nom ),

```

```

Then :
{
z:RpmCorrigée=((z:RpALaProfondeurDImplantation-Couche:ContrainteDuSolAuRepos*
y:ProfondeurImplantatioFondationP)+(z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation -
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+0.5*x:B))+
(z:RpA1BDeLaProfDImplantation - w:ContrainteDuSolAuRepos*
(y:ProfondeurImplantatioFondationP+x:B)))+(z:RpA1.5BDeLaProfDImplantation -
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+(1.5*x:B))))/4;

If ( ( z:RpALaProfondeurDImplantation - Couche:ContrainteDuSolAuRepos*
y:ProfondeurImplantatioFondationP ) > 1.3 * y:RpmCorrigée )

Then {
z:RpmCorrigée=(0.325*(z:RpALaProfondeurDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos*
y:ProfondeurImplantatioFondationP)+1.325*(z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation-
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+0.5*x:B))+1.325*
(z:RpA1BDeLaProfDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos
(y:ProfondeurImplantatioFondationP+x:B))+1.325*(z:RpA1.5BDeLaProfDImplantation-
Couche:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+(1.5*x:B)))) /4;
};
} ;

```

Cette règle a comme variables :

- x pour toute instance de la classe d'objets **FondationsSuperficielles**,
- y pour toute instance de la classe d'objets **Bloc**,
- z pour toute instance de la classe d'objets **EssaiDePénétrationStatique**,
- w pour toute instance de la classe d'objets **Couche**,
- s pour toute instance de la classe d'objets **Site**.

Elle peut se traduire comme suit :

Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NomCoucheDImplantation** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'w' de l'objet **Couche** .

Et Si pour une instance 'x' de la classe d'objet **FondationsSuperficielles** l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 'y' de l'objet **Bloc** .

Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut **NomDuSite** est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance 's' de l'objet **Site** .

Et Si pour une instance 'z' de la classe d'objet **EssaiDePénétrationStatique** l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance « y » de l'objet **Bloc** .

Alors :

Pour l'instance 'z' de la classe d'objet « **EssaiDePénétrationStatique** », l'attribut **RpmCorrigée** est calculer selon les règles DTU 13-12 comme suit :

$$z:RpmCorrigée=((z:RpALaProfondeurDImplantation-Couche:ContrainteDuSolAuRepos* y:ProfondeurImplantatioFondationP)+(z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation - w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+0.5*x:B))+ (z:RpA1BDeLaProfDImplantation - w:ContrainteDuSolAuRepos* (y:ProfondeurImplantatioFondationP+x:B)))+(z:RpA1.5BDeLaProfDImplantation - w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+(1.5*x:B))))/4;$$

Et si la valeur (**z:RpALaProfondeurDImplantation-Couche:ContrainteDuSolAuRepos\*y:ProfondeurImplantatioFondationP**) est supérieure à 1.3 **RpmCorrigée**, alors il faut refaire le calcul de **RpmCorrigée** en remplaçant la valeur(**z:RpALaProfondeurDImplantation-Couche:ContrainteDuSolAuRepos\*y:ProfondeurImplantatioFondationP**) par 1.3 **RpmCorrigée**.

### e-Règles pour le calcul du coefficient de la portance du sol :

```

/*****
      **** RULE: G12KcSableA
      *****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche s|Site|,

If :
  ( y:CoucheDImplantation = SableA )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:NomDuSite= s:Nom )
And ( y:CoucheDImplantation = w:nom )
And ( x:NomduBloc= y:Nom ),

```

#### Then :

```

{
y:Kc = 0.14 * ( 1 + 0.35 * ( 0.6 + 0.4 * x:B / x:L ) * x:De / x:B );
};

```

Cette règle a comme variables :

- x pour toute instance de la classe d'objets **FondationsSuperficielles**,
- y pour toute instance de la classe d'objets **Bloc**,
- z pour toute instance de la classe d'objets **EssaiDePénétrationStatique**,
- w pour toute instance de la classe d'objets **Couche**,
- s pour toute instance de la classe d'objets **Site**.

Elle peut se traduire comme suit :

Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut **NomCoucheDImplantation** prend la valeur « **SableA** »

Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut **NomCoucheDImplantation** est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance « w » de l'objet **Couche** .

Et Si pour une instance 'x' de la classe d'objet **FondationsSuperficielles** l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance « y » de l'objet **Bloc** .

Et Si pour une instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut « **NomDuSite** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance « s » de l'objet **Site** .

Et Si pour une instance 'z' de la classe d'objet **EssaiDePénétrationStatique** l'attribut « **NomDuBloc** » est égal à l'attribut « **Nom** » de l'instance « y » de l'objet **Bloc** .

ALORS :

Pour l'instance 'y' de la classe d'objet **Bloc** l'attribut **Kc** est calculé selon le Fascicule DTU13-12 comme suit :

$$y:Kc = 0.14 * ( 1 + 0.35 * ( 0.6 + 0.4 * x:B / x:L ) * x:De / x:B ).$$

L'attribut **Kc** dans cette règle représente le coefficient de portance du sable.

**B**, **L** et **De** représentent respectivement la largeur de la fondation superficielle, la longueur de la fondation superficielle et la profondeur d'encastrement de la fondation superficielle dans la couche porteuse.

# CONCLUSION GENERALE

---

Un sol est un système complexe, dont l'étendue physique elle-même est soumise à des hypothèses. Compte tenu de ces hétérogénéités géotechniques, et dans le but de permettre aux ingénieurs et aux chercheurs plus du temps pour mieux s'occuper du domaine de la recherche, un système expert pour l'analyse des résultats des essais géotechniques in situ est très bénéfique.

Compte tenu du nombre très élevé de concepts et d'informations utilisés en géotechniques nous avons structuré notre base de connaissance avec des classes d'objets, et des règles de production sont aussi prévues afin de décrire les opérations sur ces objets. Cette représentation nous a permis de confirmer la faisabilité d'un tel système expert.

Notre système expert a été développé à l'aide d'un générateur de système expert (Shell Kappa-Pc 2.4). Car ce générateur utilise à la fois des objets avec classes à héritage simple et des règles de production manipulant les valeurs des attributs d'objets.

L'expertise a deux origines : l'une textuelle, l'autre recueillie auprès d'un expert ; nos sources de connaissances pour la formulation des règles et des objets ont été faites en se basant sur une littérature qui englobe tout ce qui est en relation avec la reconnaissance géotechnique ainsi que par des interviews avec des ingénieurs experts dans le domaine des essais géotechniques in situ au Laboratoire Central des Travaux Publics d'Alger (**LCTP**)

Dans la représentation de la connaissance les objets permettent de travailler sur tous types d'essai (pénétrométrique, pressiométrique, ...) toutefois les règles restent à compléter pour (le calcul de la capacité portante des fondations profondes, tassement etc.) à partir de l'essai de pénétration statique. Donc la base des règles actuelles permet seulement le calcul de la capacité portante des fondations superficielles à base de l'essai CPT.

Notre SE a le critère d'extensibilité il est donc facile d'intégrer d'autres règles concernant l'interprétation des résultats des essais géotechniques in situ non encore prévus (calcul de la capacité portante des fondations profondes, estimation des tassements, etc.) à partir des différents essais.

Le raisonnement utilisé dans le système est similaire au raisonnement des experts. Pour faire le calcul de la portance de sol à partir du DTU 13-12 nous avons introduit en même temps des règles pour le calcul des coefficients de correction pour les cas (inclinaison de la base, excentricité de la charge, inclinaison de la charge, angle du talus) ; ainsi que le calcul des coefficients de portance suivant les catégories conventionnelles du sol. La conclusion finale du système est la synthèse de ces raisonnements. Le système n'impose pas des solutions à l'ingénieur, mais il apporte seulement des éléments d'évaluation qui l'aideront à prendre une décision.

Notre système expert n'est en fait qu'un premier prototype. Notre travail peut être considéré comme une étude de faisabilité d'un SE pour l'analyse des résultats des essais géotechniques in situ. Il reste à être testé auprès des experts. Leurs remarques et leurs suggestions de modifications seront prises en compte pour la suite du développement.

L'expérience menée ici permet d'affirmer l'intérêt de développer de tels systèmes. On peut donc considérer que le système expert développé dans ce mémoire est actuellement très limité on le comparant au domaine de la géotechnique qui est considéré comme très vaste.

Il serait possible d'étendre le système à l'interprétation des résultats des différents essais pour le calcul des fondations superficielles, des fondations profondes, des tassements, le calcul des soutènements etc. comme il est possible d'intégrer des règles de production pour le choix des portances en intégrant des coefficients de vraisemblances à chaque une d'elles; peut être dans ce cas il faut introduire le raisonnement flou ...

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

- [1] MARIA MALEK « SYSTÈMES EXPERTS » Notes de cours Editions : 2008  
Cycle ingénieur - Deuxième année département systèmes informatiques formels & intelligents  
[www.eisti.fr/~mma/HTML-SE/Cours/SE03.pdf](http://www.eisti.fr/~mma/HTML-SE/Cours/SE03.pdf) -
- [2] N. Duclosson - Cours IA - Systèmes à bases de règles Systèmes experts  
[www710.univ-lyon1.fr/~nguain/IA/SBR.pdf](http://www710.univ-lyon1.fr/~nguain/IA/SBR.pdf) -
- [3] Jean-Philippe de Lespinay LAROUSSE.FR
- [4] FRODUALD KABANZA : Intelligence Artificielle IFT61 « Systèmes experts » Université de Sherbrooke  
[ericbeaudry.ca/ift615/ift615-satisfaction-contraintes.ppt](http://ericbeaudry.ca/ift615/ift615-satisfaction-contraintes.ppt)
- [5] BOI FALTINGS, LIA-EPFL : Intelligence artificielle au-delà des systèmes experts,  
article n° FI10 /1994 paru le 20 décembre 1994  
[ditwww.epfl.ch/SIC/SA/.../10-94-page3.html](http://ditwww.epfl.ch/SIC/SA/.../10-94-page3.html) -
- [6] J-M. KARKAN ,G. TJOEN : SYSTEMES EXPERTS Un nouvel outil pour l'aide à la décision  
édition MASSON 1993. P154.
- [7] Atelier de Conception de Systèmes Experts Cours sur les systèmes experts  
[www.infres.enst.fr/.../CyberExpert/AideSE.html](http://www.infres.enst.fr/.../CyberExpert/AideSE.html) -
- [8] JEAN-CHARLES POMEROL : Les systèmes experts édition HERMES 1988.p 352.
- [9] DIDIER PARIGOT : Un mini système expert (application: diagnostic sérologique d'une hépatite virale aigüe) « Didier.Parigot@inria.fr »  
[www.enseignement.polytechnique.fr/.../parigot/dia.html](http://www.enseignement.polytechnique.fr/.../parigot/dia.html) -
- [10] BENOIT LAVOIE Programme de Doctorat en Informatique Cognitive Université du Québec à Montréal 8 février 2007  
[www.benoitlavoie.ca/.../Outil\\_d\\_informatique\\_cognitive\\_pour\\_transactions\\_basees\\_sur\\_le\\_Web\\_Semantique\\_\(CIT-SWT\).pdf](http://www.benoitlavoie.ca/.../Outil_d_informatique_cognitive_pour_transactions_basees_sur_le_Web_Semantique_(CIT-SWT).pdf) -
- [11] MAHFOUDI BRAHIM : Système expert Pour le diagnostic des structures bâtiment. Mémoire de Magister soutenue le moi de Decembre 2006 à l' E.N.P d' Alger.
- [12] F. CHEVRIE F. GUELY *Collection Techniqu* Cahier technique n° 191  
La logique floue  
[sitelec.org/datasheet/ct191.pdf](http://sitelec.org/datasheet/ct191.pdf)
- [13] Manuel de Kappa-Pc .2.4, Intellicorp, 1990.
- [14] NICOLAS FAURE : Représentation des connaissances géotechniques  
cours Université Jean. Moulin – Lyon III  
<https://liris.cnrs.fr/inforsid/sites/default/files/a585c1dH6Ve5TRdOw.pdf>

- [15] JEAUN LUIS ERMINE: système experts théorie et pratique  
PARIS (France): Technique et documentation –Lavoisier, 1989, 212p
- [16] Artificial Intelligence Applications in Geotechnical Engineering  
DG Toll - Electronic Journal of **Geotechnical Engineering**, 1996 - [ejge.com](http://ejge.com)
- [17]. Groupe ingenierie europe GINGER CEBTP « Etudes Géotechniques ».  
[www.ginger-cebtp.com/nos.../etudes\\_geotechniques.pdf](http://www.ginger-cebtp.com/nos.../etudes_geotechniques.pdf) -
- [18].M. DJEDID Abdelkader et Mme BENDI OULD AISSA de l'université Aboubakr Belkaid de Tlemcen. Symposium international « Qualité et maintenance au service de l'entreprise », QUALIMA 01- Tlemcen 2004.  
[www.univ-tlemcen.dz/~qualima/Programme.pdf](http://www.univ-tlemcen.dz/~qualima/Programme.pdf)
- [19].S.Belkacemi. Cours PG de l'école nationale supérieure polytechnique d'Alger 2008.
- [20] LCPC –SETRA (1972) "Recommandation FOND 72", Fascicule 2,  
Chapitre 3,4 : Méthodes géophysiques et hydrologiques de reconnaissance, LCPC.  
[alfresco.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/.../F\\_10-02.pdf?ticket...](http://alfresco.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/.../F_10-02.pdf?ticket...)
- [21] .Yves Berthaud, Patrick de Buhan et Nicolas Schmitt « Aide-mémoire de mécanique des sols ».-  
Dunod 2008-p320
- [22]. Georges Filliat « la pratique des sols et fondations » chapitre 20 Editions du Moniteur 1981.  
Pp 869-908
- [23]. Georges Filliat « la pratique des sols et fondations » chapitre 2 Editions du Moniteur 1981.  
Pp45-98.
- [24] Alain Tabbagh « Reconnaissance Géophysique » 2007  
[www.persee.fr/web/revues/home/.../hism\\_0982-1783\\_1993\\_num\\_8\\_3\\_1593](http://www.persee.fr/web/revues/home/.../hism_0982-1783_1993_num_8_3_1593)
- [25] document du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie français,  
Bureau de recherches géologiques et minières.  
« Les méthodes géophysiques utilisées en recherche d'eau minérale »  
Note technique n° 9 - Octobre 1997.  
[books.google.com/books?isbn=2953021825...](http://books.google.com/books?isbn=2953021825...)
- [26] document de l'INSA TOULOUSE géologie de l'ingénieur chapitre 5 « mesures géophysiques »  
2007  
[www.sisyphes.upmc.fr/theses/2007/these-mojica.pdf](http://www.sisyphes.upmc.fr/theses/2007/these-mojica.pdf)
- [27] J.COSTET &G.SANGLERAT « cours pratique de mécanique des sols », tome 2 « calcul des ouvrages, ChapXII. Reconnaissance des sols ». troisième édition, éditions Dunod. (1983)

- [28] A. MAHE « mécanique des sols I »chapI : « reconnaissance des sols » Ecole nationale supérieure de mécanique Nantes (France) 1983  
[www.ird.ne/ammanet/burkinaf.html](http://www.ird.ne/ammanet/burkinaf.html)
- [29] Mme: DEBICHE née SAIDANI Fatiha : « élaboration du modèle conceptuel de la base de donnée géotechnique » Thèse de Magister soutenue le moi de Juillet 2003 à l' E.N.P d'Alger.
- [30] Gilles DUPRE, le Bloc LABORATOIRE NATIONAL DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS D'HAÏTI. Dossier 3 : « LES METHODES DE RECONNAISSANCE » 2006.  
[www.lnbtgouv.ht/.../Méthode%20de%20reconnaissance%20Dossier%203.pdf](http://www.lnbtgouv.ht/.../Méthode%20de%20reconnaissance%20Dossier%203.pdf) –
- [31]George Filliat « La pratique des sols et fondations »chapitre 6. Edition du MONITEUR Paris 1981.pp 199-242.
- [32] George Filliat « La pratique des sols et fondations »chapitre 22. Edition du MONITEUR Paris 1981.pp 945-1004.
- [33] Maillard Jean – François : Revue Techniques de l'ingénieur.Construction ISSN 0245-9590 .  
[cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16005984](http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16005984) -
- [34] E.W.Brand & R.P.Brenner ( ) "Soft clay engineering exploration, sampling & in-situ testing ", Collection: developments in geotechnical engineering N<sup>o</sup>20.  
[link.aip.org/link/?JGGEFK/136/650/1](http://link.aip.org/link/?JGGEFK/136/650/1)
- [35] ALI BOUAFIA " Mécanique des sols "principes de base exercices résolus. Edition el Maarifa(2003) .pp 49-74
- [36] Maurice Cassan "Les essais in situ en mécanique des sols " Tome 1. Edition Eyrolles. (1978) p 449.
- [37]Gilles DUPRE, le Bloc «Les méthodes de reconnaissance" Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics d'Haïti 2006.  
[www.lnbtgouv.ht/.../Méthode%20de%20reconnaissance%20Dossier%203.pdf](http://www.lnbtgouv.ht/.../Méthode%20de%20reconnaissance%20Dossier%203.pdf) -
- [38] LCPC –SETRA "L'essai de pénétration statique", rédigé par : Edwin WASCiHKOWSKI. PROJET DE METODE D'ESSAI n<sup>o</sup>30 (1988).  
[media.lcpc.fr/ext/pdf/me/me\\_30.pdf](http://media.lcpc.fr/ext/pdf/me/me_30.pdf) -
- [39] document de DLC(Direction de Laboratoire des Chaussées) .Bultin d'information technique Vol. 9, no10, octobre 2004 Le pénétromètre dynamique  
[www.mtq.gouv.qc.ca/.../49BEB7877BC400BFE04400144F0104BD](http://www.mtq.gouv.qc.ca/.../49BEB7877BC400BFE04400144F0104BD) -
- [40] Gilles DUPRE, le Bloc :les méthodes de reconnaissance Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics D'Haïti.  
[www.lnbtgouv.ht/.../Méthode%20de%20reconnaissance%20Dossier%203.pdf](http://www.lnbtgouv.ht/.../Méthode%20de%20reconnaissance%20Dossier%203.pdf) –

- [41] Gérard ARSONNET, Jean-Pierre BAUD, Michel GAMBIN : réalisation du forage pour essais pressiométriques par un système de tube fendu auto-fore (staff)  
Symposium international 50ans de pressiomètre 2005  
[www.geomatech.net/pages/enbref.html](http://www.geomatech.net/pages/enbref.html) -
- [42] Duttine Antoine « Comportement des sables et des mélanges sable / argile sous sollicitations statiques et dynamiques avec et sans rotations d'axes ».  
Thèse de doctorat Soutenue à l'institut National des sciences appliquées de Lyon le 10 Juin 2005.  
[docinsa.insa-lyon.fr/these/2005/duttine/07\\_partie\\_1.pdf](http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2005/duttine/07_partie_1.pdf)
- [43] O. Beckerich, J. Garnier, G. Rault  
Un mini pressiomètre pour essais sur modèles réduits centrifugés  
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
D. Levacher Université du Havre  
[www.paralia.fr/Files/05\\_41\\_8p\\_bekerich.pdf](http://www.paralia.fr/Files/05_41_8p_bekerich.pdf) -
- [44] essais pressiométriques et dilatométriques interprétation et utilisation des résultats ROCTEST  
[www.roctest.com/.../PMT-VERSION-7%20-FRANCAIS.pdf](http://www.roctest.com/.../PMT-VERSION-7%20-FRANCAIS.pdf) -
- [45] Tavenas F. Leroueil S. Laboratory and in situ stress-strain time behavior of soft clays: Proc .of Int.Symp.on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City(1987)., vol 2, pp.3-48.
- [46] Vinod K. Garga and Mahbulul A. Khan Canadian geotechnical journal Can. Geotech. J. 29(4): 627–637 (1992) | doi:10.1139/t92-070 | © 1992 NRC Canada “ Interpretation of field vane strength of an anisotropic soil”  
[article.pubs.nrc-cnrc.gc.ca/ppv/RPViewDoc?issn=1208-6010...6...](http://article.pubs.nrc-cnrc.gc.ca/ppv/RPViewDoc?issn=1208-6010...6...)
- [47] document interne de lcpc Catalogue des matériels mlpc  
[www.lcpc.fr](http://www.lcpc.fr) > ... > Recherches > Résultats récents -

**Classe d'objet EssaiDePénétrationDynamique :**

Tableau 1 : Description des attributs de la classe d'objets EssaiDePénétrationDynamique.

CLASSE	ATTRIBUTS	VALLEURS	TYPES	METHODES
	Nom De L' Appareil	-Léger manuel FONDASOL -Léger motorisé ETF-Toulouse -Lourd Andina.	Texte	
	P.D.A	-Angle de pointe 90°, -Section nominale 30cm <sup>2</sup> , -Diametre62±0,2mm -Longueur de la partie cylindrique 62±0,2mm, -Diamètre des tiges 40à45mm ;	Texte	
	Nom Du Bloc			
	P.D.B	-Angle de pointe 90°, -Section nominale 20cm <sup>2</sup> , -Diametre51±0,2mm, -Longueur de la partie cylindrique 51±0,2mm, -Diamètre des tiges32±0,3mm	Texte	
	Type De Pointe	Fixe Perdue	Texte	
	Hauteur De Chute	32±0,3mm	Nombre	
	Poids Du Mouton	63,5±0,5kg	Nombre	
	Cadence De Battage		Nombre	
	Norme	Algérienne Française ASTM	Liste Texte	
	Nombre De Couches	0,1,2,3	Liste Nombre	
	Profondeur D'investigation		Nombre	
	Niveau De La Nappe		Nombre	
	N <sub>1</sub>		Nombre	
	N <sub>2</sub>		Nombre	
	N <sub>3</sub>		Nombre	

Tableau 2: Description des attributs de la classe d'objet EssaiSPT.

CLASSE	ATTRIBUTS	VALEURS	TYPES	METHODES
	Nom De Bloc			
	Nom De L'Appareil		Texte	
	Type De L'Appareil	Standard A paroi mince A paroi épaisse	Texte Texte Texte	
	Poids Du Mouton		Nombre	
	Hauteur De Chute		Nombre	
	Longueur Total Du Carottier		Nombre	
	Longueur Intérieur Du Carottier		Nombre	
	Diamètre Extérieur Du Carottier		Nombre	
	Diamètre Intérieur Du Carottier		Nombre	
	Diamètre Du Forage		Nombre	
	Forage Tubé	Oui Non	Booléen	
	Norme	Algérienne Française ASTM	Liste Texte	
	Nombre De Couches	1,2,3	Liste Nombre	
	Profondeur D'Investigation		Nombre	
	Niveau De La Nappe		Nombre	
	$N_1$		Nombre	
	$N_2$		Nombre	
	$N_3$		Nombre	

**Classe d'objet EssaiPressiométrique :**

Tableau 3: Description des attributs de la classe d'objet EssaiPressiométrique.

CLASSE	ATTRIBUTS	VALEURS	TYPES	METHODES
	Nom D Appareil	-pressiomètre Ménard - Texam - Pencil - Tri-mode - Boremac - Auto-foreur du LCPC -Sonde conique de Ladanyi	Liste Texte	
	Type D Appareil	-Mesure par injection de fluide -Mesure direct	Liste Texte	
	Méthodes De Mise En Place	-Forage -Auto-forage -Fonçage et battage	Liste Texte	
	Norme	Algérienne Française ASTM	Liste Texte	
	Nombre De Couches	1,2,3	Liste Nombre	
	Nom Du Bloc			
	Profondeur D'Investigation		Nombre	
	Niveau De La Nappe		Nombre	
	Pi		Nombre	
	P0		Nombre	
	Pf		Nombre	
	Pl		Nombre	

**Classe d'objet EssaiScissométrique :**

Tableau 4: Description des attributs de la classe d'objet EssaiScissométrique.

CLASSE	ATTRIBUTS	VALEURS	TYPES	METHODES
	Scissomètres Utilisés Pour Des Mesures En Fond De Forage	Wykeham Farnell	Texte	
	Scissomètres Foncés Directement	Wykeham Farrance Simec	Texte	
	Nom DuBloc		Texte	
	Rayon r		Nombre	
	Longueur Du Bras		Nombre	
	Norme	Algérienne Française ASTM	Liste Texte	
	Nombre De Couches	1,2,3	Liste Nombre	
	Profondeur D'Investigation		Nombre	
	Niveau De La Nappe		Nombre	
	f		Nombre	

**Classe d'objet FondationsProfondes :**

Tableau 5 : Description des attributs de la classe d'objets FondationsProfondes.

CLASSE	ATTRIBUTS	VALEURS	TYPES	METHODES
	Nom		Texte	
	CoordonnéeX1		Nombre	
	CoordonnéeY1		Nombre	
	CoordonnéeZ1		Nombre	
	Type	Pieu battu Pieu foré Puits	Texte Texte Texte	
	Nom Du Bloc		Texte	
	Diamètre		Nombre	
	Longueur		Nombre	
	Travail en pointe	Oui Nom	Texte Texte	
	Mobilise le frottement latéral	Oui Nom	Texte Texte	
	FacteurDeSécurité		Nombre	
	NomDeCouche		ListeTexte	
	CoucheDImplantation	Couche 1 Couche 2 Couche 3	Liste Texte	

**Règles**

```

/*****
****  RULE: Rm1
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site|,

```

**If**

```

( z:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:NombreEssaiPénétroStatique= 1 ),

```

**Then**

```

{
y:Rm = z:RpALaProfationdeurDImplantation;
};

```

```

/*****
****  RULE: Herminier1
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site|,

```

**If**

```

( z:TypeDePointe = Simple )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( x:NomDuBloc= y:Nom )
And ( z:NomDuBloc = y:Nom ),

```

**Then**

```

{
y:qaHerminier = y:Rm / 10;
PostMessage( "qaHerminier:", y:qaHerminier, "PourBloc:", y:Nom );
};

```

```

/*****
****  RULE: SangleratSF1
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site|,

```

**If :**

```

( y:CouchedImplantation = PurementCohérente )
And ( x:Type= SemelleFilante )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:Bloc= y:Nom ),

```

**Then :**

```

{
y:qaSanglerat = ((w:PoidVolumiqueApparentHumide * x:D )+((5.14 *
y:CuCoucheDImplantation ) / x:FacteurDeSécurité ) );
PostMessage( "qaSanglerat:", y:qaSanglerat, "PourBloc:", y:Nom );
};

```

```

/*****
****  RULE: SangleratSI1
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If:
( y:CoachedImplantation = PurementCoérente )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( x:Type = SemelleIsolée )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom ),

Then:
{
y:qaSanglerat=((w:PoidVolumiqueApparentHumide*x:D)+((5.14 * ( 1 + 0.2 * x:B
/ x:L ) * y:CuCoucheDImplantation ) / x:FacteurDeSécurité ) );
PostMessage( "qaSanglerat:", y:qaSanglerat, "PourBloc:", y:Nom );
};

/*****
****  RULE: Rm3
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :
( z1:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z2:NomDuBloc= y:Nom )
And ( z3:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NombreEssaiPénétroStatique= 3 ),

Then :
{
y:Rm =((z1:RpALaProfationdeurDImplantation +
z2:RpALaProfationdeurDImplantation + z3:RpALaProfationdeurDImplantation ) /
3 );
};

/*****
****  RULE: Rm4
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :
( z1:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z2:NomDuBloc= y:Nom )
And ( z3:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z4:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NombreEssaiPénétroStatique = 4 ),
Then :
{
y:Rm = ( ( z1:RpALaProfationdeurDImplantation +
z2:RpALaProfationdeurDImplantation+z3:RpALaProfationdeurDImplantation+
z4:RpALaProfationdeurDImplantation)/4 );
};

```

```

/*****
****  RULE: G11KcArgileEtLimonABC
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

```

If :
( y:CoucheDImplantation = ArgileEtLimonABC )
And ( y:NomDuSite= s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:NomDuSite= s:Nom )
And ( y:CoucheDImplantation = w:nom )
And ( x:NomduBloc= y:Nom ),

```

```

Then :
{
y:Kc = 0.32 * ( 1 + 0.35 * ( 0.6 + 0.4 * x:B / x:L ) * x:De / x:B );
};

```

```

/*****
****  RULE: G13KcCraieMarneMarnoCalcaire
*****/
|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

```

If :
( y:CoucheDImplantation = CraieMarneMarno-Calcaire )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:CoucheDImplantation= w:nom )
And ( x:NomduBloc = y:Nom ),

```

```

Then :
{
y:Kc = 0.17 * ( 1 + 0.27 * ( 0.6 + 0.4 * x:B / x:L ) * x:De / x:B );
};

```

```

/*****
****  RULE: G14KcSableEtGraveB
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

```

If :
( y:CoucheDImplantation = SableEtGraveB )
And ( y:NomDuSite= s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:NomDuSite= s:Nom )
And ( y:CoucheDImplantation = w:nom )
And ( x:NomduBloc= y:Nom ),

```

```

Then :
{
y:Kc = 0.11 * ( 1 + 0.50 * ( 0.6 + 0.4 * x:B / x:L ) * x:De / x:B );
};

```

```

/*****
**** RULE: G15
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( y:CoucheDImplantation = SableEtGraveC )
And ( y:NomDuSite= s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:NomDuSite= s:Nom )
And ( y:CoucheDImplantation = w:nom )
And ( x:NomduBloc= y:Nom ),

```

**Then :**

```

{
y:Kc = 0.08 * ( 1 + 0.80 * ( 0.6 + 0.4 * x:B / x:L ) * x:De / x:B );
};

```

```

/*****
**** RULE: DTU2
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:NomDuBloc= y:Nom ),

```

**Then :**

```

{
z:RpmCorrigée = ( ( z:RpALaProfondeurDImplantation -
w:ContrainteDuSolAuRepos
*y:ProfondeurImplantatioFondationP)+(z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation -
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+0.5*x:B))+
(z:RpA1BDeLaProfDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos*
y:ProfondeurImplantatioFondationP+x:B))+(z:RpA1.5BDeLaProfDImplantation -
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+(1.5*x:B))))/4;

```

```

If ( ( z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation - w:ContrainteDuSolAuRepos*
(y:ProfondeurImplantatioFondationP+0.5*x:B))>=1.3*z:RpmCorrigée)

```

Then {

```

z:RpmCorrigée =(1.325*(z:RpALaProfondeurDImplantation-
w:ContrainteDuSolAuRepos*
y:ProfondeurImplantatioFondationP)+0.325*(z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation-
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+0.5*x:B))+1.325
*
(z:RpA1BDeLaProfDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos*
(y:ProfondeurImplantatioFondationP+x:B))+1.325*(
z:RpA1.5BDeLaProfDImplantation- w:ContrainteDuSolAuRepos*(
y:ProfondeurImplantatioFondationP+(1.5*x:B))))/ 4;
};
} ;

```

```

/*****
****  RULE: DTU3
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :
  ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:NomDuBloc= y:Nom ),

Then :
{
z:RpmCorrigée=((z:RpALaProfondeurDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos
*y:ProfondeurImplantatioFondationP)+(z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation-
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+0.5*x:B))+
(z:RpAlBDeLaProfDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos*
(y:ProfondeurImplantatioFondationP+x:B)))+(z:RpAl.5BDeLaProfDImplantation-
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+(1.5*x:B)))/4;

If((z:RpAlBDeLaProfDImplantation-Couche:ContrainteDuSolAuRepos*
(y:ProfondeurImplantatioFondationP+x:B))>=1.3*z:RpmCorrigée)

Then {
z:RpmCorrigée = ( 1.325 * ( z:RpALaProfondeurDImplantation-
w:ContrainteDuSolAuRepos* y:ProfondeurImplantatioFondationP )+ 1.325 *
( z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation- w:ContrainteDuSolAuRepos*
( y:ProfondeurImplantatioFondationP+ 0.5* x:B ) )+ 0.325 *
( z:RpAlBDeLaProfDImplantation- w:ContrainteDuSolAuRepos*
( y:ProfondeurImplantatioFondationP+ x:B ) )+ 1.325 *
( z:RpAl.5BDeLaProfDImplantation- w:ContrainteDuSolAuRepos*
( y:ProfondeurImplantatioFondationP+ ( 1.5*x:B ) ) ) )/ 4;

};

/*****
****  RULE: DTU4
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :
  ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:NomDuBloc= y:Nom ),

Then :
{

z:RpmCorrigée=((z:RpALaProfondeurDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos*
y:ProfondeurImplantatioFondationP)+(z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation -
w:ContrainteDuSolAuRepos * ( y:ProfondeurImplantatioFondationP+0.5*x:B))+
(z:RpAlBDeLaProfDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos*
(y:ProfondeurImplantatioFondationP+x:B)))+(z:RpAl.5BDeLaProfDImplantation -
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+(1.5*x:B)))/
4;

If((z:RpAl.5BDeLaProfDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos*
(y:ProfondeurImplantatioFondationP+(1.5* x:B ) ) ) >= 1.3 * z:Rplcorrigée
)

```

```

Then {

z:RpmCorrigée=(1.325*(z:RpALaProfondeurDImplantation-
w:ContrainteDuSolAuRepos*
y:ProfondeurImplantatioFondationP)+1.325*(z:RpA0.5BDeLaProfDImplantation-
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+0.5*x:B))+1.325
*
( z:RpAlBDeLaProfDImplantation-w:ContrainteDuSolAuRepos*
(y:ProfondeurImplantatioFondationP+x:B))+0.325*(z:RpAl.5BDeLaProfDImplantat
ion-
w:ContrainteDuSolAuRepos*(y:ProfondeurImplantatioFondationP+(1.5*x:B))))/4;

};
};

```

```

/*****
**** RULE: Herminier1Bis
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

```

If :
( z:TypeDePointe = Double )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( x:NomDuBloc= y:Nom )
And ( z:NomDuBloc = y:Nom ),

```

```

Then :
{
y:qaHerminier = y:Rm / 15;
PostMessage( "qaHerminier:", y:qaHerminier, "PourBloc:", y:Nom );
} ;

```

```

/*****
**** RULE: G2
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

```

If :
( x:InclinaisonDeLaBase = 0 )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge= 0 )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge = 0 )
And ( s:AngleDuTalus > 5° )
And ( s:AngleDuTalus <= 20° )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation >=25° )

```

```

Then :
{
x:CoefficientDeCorrection = ( -0.03 * s:AngleDuTalus + 0.9 );
} ;

```

```

/*****
****  RULE: G3
*****/

x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :

    ( x:InclinaisonDeLaBase = 0 )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge<= 20° )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge = 0 )
And ( s:AngleDuTalus= 0 )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation >= 25° )

Then :

    {
    x:CoefficientDeCorrection = ( -0.04 * x:InclinaisonDeLaCharge + 0.9 );
    } ;

/*****
****  RULE: G4
*****/

x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :

    ( x:InclinaisonDeLaBase <= 20° )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge= 0° )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge = 0 )
And ( s:AngleDuTalus= 0 )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:Bloc= y:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation >= 25° ),

Then :

    {
    x:CoefficientDeCorrection = ( -0.02 * x:InclinaisonDeLaBase + 0.9 );
    } ;

```

```

/*****
****  RULE: G5
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( x:InclinaisonDeLaBase <= 20° )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge<= 20° )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge = 0 )
And ( s:AngleDuTalus> 0° )
And ( s:AngleDuTalus <= 5° )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation>=25° ),

```

**Then :**

```

{
x:CoefficientDeCorrection =(-0.05 *s:AngleDuTalus + 1)+(-0.04 *
x:InclinaisonDeLaCharge +1);
};

```

```

/*****
****  RULE: G6
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( x:InclinaisonDeLaBase <= 20° )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge= 0° )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge = 0 )
And ( s:AngleDuTalus> 0° )
And ( s:AngleDuTalus <= 5° )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation>=25° ),

```

**Then :**

```

{
x:CoefficientDeCorrection =(-0.05*s:AngleDuTalus +1)+(-0.02 *
x:InclinaisonDeLaBase + 1 );
};

```

```

/*****
**** RULE: G7
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( x:InclinaisonDeLaBase = 0° )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge <= 20° )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge = 0 )
And ( s:AngleDuTalus > 5° )
And ( s:AngleDuTalus <= 20° )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation >= 25° ),

```

**Then :**

```

{
x:CoefficientDeCorrection = ( -0.03 * s:AngleDuTalus + 0.9 ) + ( -0.04 *
x:InclinaisonDeLaCharge + 1 );
};

```

```

/*****
**** RULE: G8
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( x:InclinaisonDeLaBase <= 20° )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge = 0° )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge = 0 )
And ( s:AngleDuTalus > 5° )
And ( s:AngleDuTalus <= 20° )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation >= 25° ),

```

**Then :**

```

{
x:CoefficientDeCorrection = ( -0.03 * s:AngleDuTalus + 0.9 ) + ( -0.02 *
x:InclinaisonDeLaBase + 1 );
} );

```

```

/*****
**** RULE: G9
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( x:InclinaisonDeLaBase <= 20° )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge<= 20° )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge = 0 )
And ( s:AngleDuTalus> 0° )
And ( s:AngleDuTalus <= 5° )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation>=25° ),

```

**Then :**

```

{
x:CoefficientDeCorrection=((-0.05* s:AngleDuTalus +1 )+ ( -0.04 *
x:InclinaisonDeLaCharge + 1 )+ ( -0.02 * x:InclinaisonDeLaBase + 1 ) );
};

```

```

/*****
**** RULE: G10
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( x:InclinaisonDeLaBase <= 20° )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge<= 20° )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge = 0 )
And ( s:AngleDuTalus<= 20° )
And ( s:AngleDuTalus > 5° )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation >=25° ),

```

**Then :**

```

{
x:CoefficientDeCorrection=((-0.03* s:AngleDuTalus + 0.9 )+ ( -0.04 *
x:InclinaisonDeLaCharge + 1 )+ ( -0.02 * x:InclinaisonDeLaBase + 1 ) );
};

```

```

/*****
**** RULE: SangleratScl
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( w:CoucheDImplantation = PurementCohérente )
And ( x:Type= SemelleFilante )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z:Bloc= y:Nom ),

```

**Then :**

```
{
y:qaSanglerat=((w:PoidVolumiqueApparentHumide*x:D)+((6.2*y:CuCoucheDImplant
ation)/ x:FacteurDeSécurité ) );
PostMessage( "qaSanglerat:", y:qaSanglerat, "PourBloc:", y:Nom );
};
```

```
/*****
**** RULE: DTU5
*****/
```

```
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,
```

**If :**

```
( w:CoucheDImplantation = PurementCohérente )
And ( y:NomDuSite= s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( x:Type= SemelleFilante )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom ),
```

**Then :**

```
{
z:qaDTU1=(z:RpmCorrigée*y:Kc+w:ContrainteDuSolAuRepos)/x:FacteurDeSécurité;
} ;
```

```
/*****
**** RULE: SangleratSimple
*****/
```

```
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,
```

**If :**

```
( z:TypeDePointe = Simple )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom ),
```

**Then :**

```
{
y:CuCoucheDImplantation = ( y:Rm / y:10 );
} ;
```

```
/*****
**** RULE: SangleratDouble
*****/
```

```
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,
```

**If :**

```
( z:TypeDePointe = Double )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( z:Bloc = y:Nom ),
```

```

Then :
  {
    y:CuCoucheDImplantation = ( y:Rm / y:15 );} ;
    /*****
      **** RULE: DTU6
      *****/
    x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :
  ( z:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:NombreEssaiPénétroStatique= 1 ),

Then :
  {
    y:qaDTU = z:qaDTU1;
    PostMessage( "qaDTU:", y:qaDTU, "parBloc:", y:Nom );
  } );

    /*****
      **** RULE: DTU7
      *****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z1|EssaiDePénétrationStatique
z2|EssaiDePénétrationStatique w|Couche s|Site,

If :
  ( z1:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z2:NomDuBloc= y:Nom )
And ( y:NombreEssaiPénétroStatique = 2 ),

Then :
  {
    y:qaDTU = ( z1:qaDTU1 + z2:qaDTU1 ) / 2;
    PostMessage( "qaDTU:", y:qaDTU, "PourBloc:", y:Nom );
  } );

    /*****
      **** RULE: DTU8
      *****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z1|EssaiDePénétrationStatique
z2|EssaiDePénétrationStatique z3|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :
  ( z1:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z2:NomDuBloc= y:Nom )
And ( z3:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NombreEssaiPénétroStatique= 3 ),

Then :
  {
    y:qaDTU = ( z1:qaDTU1 + z2:qaDTU1 + z3:qaDTU1 ) / 3;
    PostMessage( "qaDTU:", y:qaDTU, "parBloc:", y:Nom );} ;

```

```

/*****
**** RULE: DTU9
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z1|EssaiDePénétrationStatique
z2|EssaiDePénétrationStatique z3|EssaiDePénétrationStatique
z4|EssaiDePénétrationStatique w|Couche s|Site,

If :
  ( z1:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( z2:NomDuBloc= y:Nom )
And ( z3:NomDuBloc = y:Nom )
And ( z4:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NombreEssaiPénétroStatique = 4 ),

Then :
{
y:qaDTU = ( z1:qaDTU1 + z2:qaDTU1 + z3:qaDTU1 + z4:qaDTU1 )/ 4;
PostMessage( "qaDTU:", y:qaDTU, "parBloc:", y:Nom );
} ;

/*****
**** RULE: G17
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :
  ( x:NombreDeCouche = 2 )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( y:CoucheDImplantation = w:nom )
And ( x:CoucheDImplantation= Couchel ),

Then :
{
x:h1 / x:B < 1.5;
PostMessage( "IL FAUT CALCULER UNIQUEMENT LA CAPACITE PORTANTE DE LA COUCHE
N°2" );
};

/*****
**** RULE: G18
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

If :
  ( x:NombreDeCouche = 2 )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation = w:Nom )
And ( y:NomDuSite= s:Nom )
And ( y:CoucheDImplantation = w:nom )
And ( x:CoucheDImplantation= Couchel ),

```

```

Then :
  {
    x:h1 / x:B > 3.5;
    PostMessage("IL FAUT CALCULER UNIQUEMENT LA CAPACITE PORTANTE DE LA COUCHE
    N°1" );
  } ;

```

```

/*****
**** RULE: G19
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

```

If :
  ( x:NombreDeCouche = 2 )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( y:CoucheDImplantation = w:nom )
And ( x:CoucheDImplantation= Couchel ),

```

```

Then :
  {
    1.5 < x:h1 / x:B < 3.5;
    PostMessage("IL FAUT VERIFIER LA PORTANCE DE LA COUCHE N°1 ET CELLE DE LA
    COUCHE N°2" );
  } ;

```

```

/*****
**** RULE: G20
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

```

If :
  ( s:AngleDuTalus > 0 )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( z:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation>= 25° ),

```

```

Then :
  {
    x:d / x:B >= 2;
    PostMessage( "LORSQUE d/B>=2, POUR UN ANGLE DU FROTTEMENT INTERNE PRENANT
    DES VALEURS DE 25° A 30°, TOUT SE PASSE COMME SI LE TERRAIN DE FONDATION
    ETAIT HORIZONTAL" );
  } ;

```

```

/*****
****  RULE: G21
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( s:AngleDuTalus > 0 )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( z:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation>= 25° ),

```

**Then :**

```

{
x:d / x:B >= 5;
PostMessage( "LORSQUE d/B>=5 POUR UN ANGLE DU FROTTEMENT PRENANT DES
VALEURS
DE 30° A 40°, TOUT SE PASSE COMME SILE TERRAIN DE FONDATION ETAIT
HORIZONTALE" );
};

```

```

/*****
****  RULE: G22
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( x:InclinaisonDeLaBase = 0 )
And ( x:InclinaisonDeLaCharge= 0 )
And ( x:ExcentricitéDeLaCharge=0 )
And ( s:AngleDuTalus = 0 )
And ( x:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:NomDuSite = s:Nom )
And ( y:NomCoucheDImplantation= w:Nom )
And ( z:NomDuBloc = y:Nom )
And ( y:FiCoucheDImplantation>= 25° ),

```

**Then :**

```

{
x:CoefficientDeCorrection = 1;
};

```

```

/*****
****  RULE: G23
*****/
x|FondationsSuperficielles y|Bloc z|EssaiDePénétrationStatique w|Couche
s|Site,

```

**If :**

```

( y:FiCoucheDImplantation>= 25° ),

```

**Then :**

```

{
w:CouchesDImplantation ≠ PurementCohérente ;
};

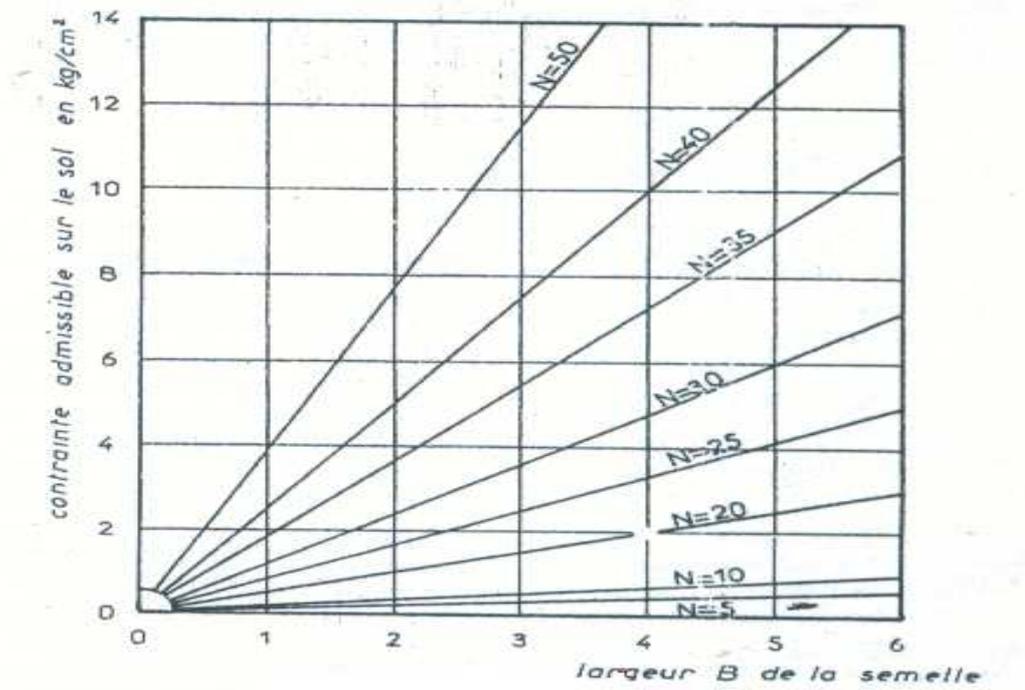
```

**Catégories conventionnelles de sols :**

Tableau 6 : Catégories conventionnelles de sols .

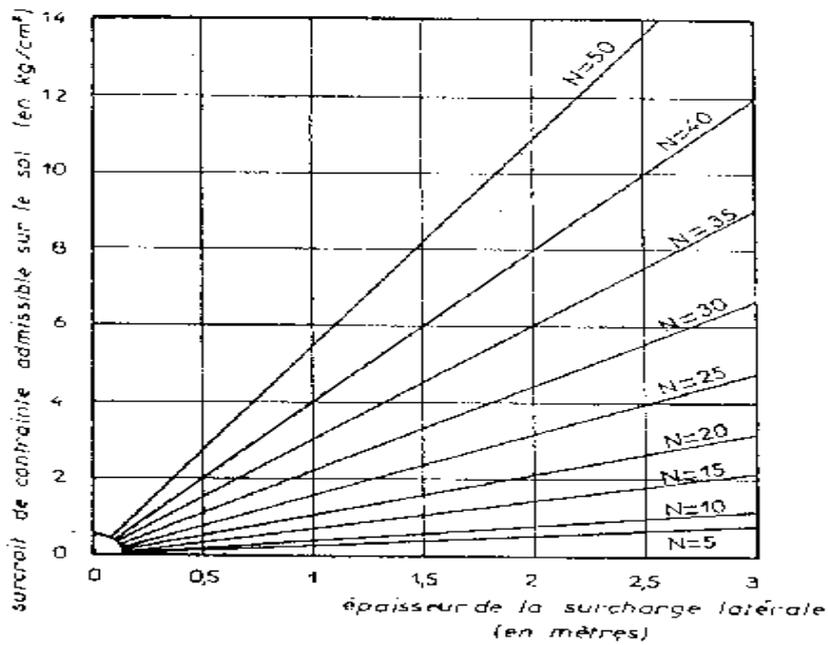
Classe de sol			Pressiomètre Pi(Mpa)	Pénétromètre Rp (Mpa)
Argile, Limons	A	Argiles et limons mous	<0.7	<3.0
	B	Argiles et limons fermes	1.2-2.0	3.0-6.0
	C	Argiles très fermes à dures	>2.5	>6.0
Sables, Graves	A	Lâche	<0.5	<5.0
	B	Moyennement compacts	1.0-2.0	8.0-15.0
	C	Compacts	>2.5	>20
Craies	A	Molles	<0.7	<5.0
	B	Altérées	1.0-2.5	>5.0
	C	Compacts	>3.0	----
Marnes Marno-calcaires	A	Tendes	1.5-4.0	----
	B	Compactes	>4.5	----
Roches*	A	Altérées	2.5-4.0	----
	B	Fragmentées	>4.5	----

(\*) L'application « roche » peut regrouper des matériaux divers : calcaire, schiste, granite, etc.  
 Cette classification est réservée aux matériaux présentant des modules pressiométriques > 50 à 80 MPA

**Abaques de Terzaghi et Peck :**

Abaque 1: Abaque de Terzaghi et Peck contrainte admissible pour une semelle sans surcharge latérale.

**Surcroît de contrainte admissible dû à la présence d'une surcharge latérale  
D'après Terzaghi et Peck**



Abaque 2 : Surcroît de contrainte admissible dû à la présence d'une surcharge latérale  
D'après Terzaghi et Peck