

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

M0011/93A

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

refaire
le PDF

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



THESE DE MAGISTER

*Présentée par : Mustapha KEBAILI
Ingénieur d'état en Génie Civil
diplômé de l'U.S.T.H.B.*

THEME

**EVALUATION DES TECHNIQUES DE PREDICTION
DU GONFLEMENT DES ARGILES EXPANSIVES**

Application aux Argiles d'IN-AMENAS

Soutenue publiquement le Mercredi 07 Juillet 1993 devant le jury composé de:

MM.	A. BALI	Professeur à l'E.N.P.	Président
	S. BELKACEMI	Maître de Conférences à l'E.N.P.	Rapporteur
	A. BOUAFIA	Thèse Unique	U. BLIDA Examineur
	K. KADRI	Professeur au C.U. CHLEF	Examineur
	T. MESSAFER	Maître de Conférences à l'E.N.P.	Examineur

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THESE DE MAGISTER

*Présentée par : Mustapha KEBAILI
Ingénieur d'état en Génie Civil
diplômé de l'U.S.T.H.B.*

THEME

**EVALUATION DES TECHNIQUES DE PREDICTION
DU GONFLEMENT DES ARGILES EXPANSIVES**

Application aux Argiles d'IN-AMENAS

Soutenue publiquement le Mercredi 07 Juillet 1993 devant le jury composé de:

MM.	A. BALI	Professeur à l'E.N.P.	Président
	S. BELKACEMI	Maître de Conférences à l'E.N.P.	Rapporteur
	A. BOUAFIA	Thèse Unique U.BLIDA	Examineur
	K. KADRI	Professeur au C.U.CHLEF	Examineur
	T. MESSAFER	Maître de Conférences à l'E.N.P.	Examineur

*La mécanique des sols est l'art de porter le
meilleur jugement sur le comportement de ceux-ci, lorsque peu
d'informations sont disponibles.*

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis de remercier tous ceux qui m'ont aidé et guidé à entamer, et finaliser ce projet de Magister.

Je remercie, tout d'abord, monsieur S. BELKACEMI qui a bien voulu me proposer ce sujet original, et m'y encadrer. Sans rien ménager de son expérience, monsieur BELKACEMI m'a guidé avec rigueur et fermeté, je lui dois beaucoup pour ma formation et pour l'aboutissement de ce travail.

Le professeur IR. J. F. THIMUS, de l'Université Catholique de LOUVAIN, m'a fait l'honneur de me recevoir à l'U.C.L. pour un stage d'un mois. monsieur THIMUS n'a épargné aucun effort pour me mettre à l'aise, et mettre à ma disposition des documents qui m'étaient indispensables. Je l'en remercie au delà du verbe.

Je remercie, particulièrement, monsieur A. KADRI, recteur de l'Université de Chlef, pour avoir accepté d'examiner ce rapport, malgré ses occupations.

Puis-je, aussi, exprimer ma gratitude à messieurs A. BALI, T. MESSAFER, et A. BOUAFIA sans le dérangement de qui, ce projet n'aurait pu être soutenu.

J'adresse, de même, mes vifs et sincères remerciements à mon collègue D. SAIS qui a bien voulu m'aider dans le traitement informatique de certains aspects liés à ce sujet.

Je tiens à remercier monsieur B. AMEUR pour avoir contribué à ma formation, et pour ses encouragements, et son soutien moral.

J'exprime également toute ma gratitude au personnel et responsables du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (unité de OUARGLA) pour leur soutien, et leur serviabilité. Que monsieur K. ZEKRI soit remercié.

Je remercie enfin, de peur d'oublier des noms, tous ceux qui, de façon, ou d'une autre, ont contribué que j'ai, aujourd'hui, acquis ces connaissances.

LISTE DES SYMBOLES



- A : Activité de l'échantillon de sol selon SKIMPTON (I_p/C).
- C : Teneur en argile de l'échantillon de sol (pourcentage des inférieurs à deux microns).
- E : Coefficient introduit par NAYAK et CHRISTENSEN (1971), désignant la limite de liquidité, l'indice de plasticité ou l'indice de retrait (%).
- e_o : Indice des vides initiale de l'échantillon de sol.
- H : Profondeur d'échantillonnage du spécimen de sol (cm).
- H_o : Profondeur d'échantillonnage équivalente à la pression exercée par le piston de la cellule oedométrique (cm).
- h : Epaisseur de l'échantillon de sol, lorsqu'introduit dans la trousse oedométrique (cm).
- I_p : Indice de plasticité de l'échantillon de sol (%).
- I_r : Indice de retrait de l'échantillon de sol (%).
- k : Coefficient introduit par SEED et al. (1962), dépendant de la composition minéralogique centésimale du sol.
- n : Teneur en argile correspondant à un indice de retrait nul (abscisse à l'origine de la courbe $I_r = f(C)$).
- P : Pression de gonflement prédite (bars).
- P_m : Pression de gonflement mesurée (bars).
- P_p : Pression de préconsolidation du sol (bars).
- P_o : Pression effective exercée sur l'échantillon de sol, sur site (bars).
- S : Pourcentage de gonflement mesuré (bars).
- S_m : Pourcentage de gonflement mesuré selon la procédure A.S.T.M D-45-46-86 Méthode A (%).
- γ_d : Poids volumique sec de l'échantillon de sol (g/cm^3).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Intervalles des Capacités d'Echange de Cations de Différents Minéraux Argileux (d'Après WOUWARD-CLYDE et Associés).....	7
Tableau 2.2	Valeurs des Limites d'ATTERBERG de Différents Minéraux Argileux avec Différents Cations Adsorbés.....	8
TABLEAU 3.1	Contribution des Paramètres Physiques, et Mécaniques, et Expressions des Modèles de Prédiction du Potentiel de Gonflement des Sols Expansifs.....	35
Tableau 4.1	Caractéristiques Géophysiques des Echantillons de Sols Etudiés.....	45
TABLEAU 4.2	Résultats des Modèles de Prédiction du Potentiel de Gonflement par Divers Auteurs.....	46
TABLEAU 4.3	Caractéristiques des Sols Etudiés par NAYAK et CHRISTENSEN (1971).....	50
TABLEAU 4.4	Résultats de Mesures Expérimentales sur Sols d'IN-AMENAS (TAS, 1992).....	79
TABLEAU 4.5	Echantillons de sol Expansif d'IN-AMENAS Pour Lesquels le Pourcentage de Gonflment Prédit, par Divers Auteurs, est le Plus Proche du Pourcentage de Gonflement Mesuré au Laboratoire.....	71
TABLEAU 4.6	Expressions des Modèles Apres Régressions, et Leurs Résultats de Prédiction.....	80

LISTE DES FIGURES



Figure 2.1.a Structure Tétraédrique d'un Minéral Argileux.....8

Figure 2.1.b Structure Octaédrique d'un Minéral Argileux.....9

Figure 2.2 Arrangement (1:1), un plan tétraédrique, et un plan octaédrique.....10

Figure 2.3 Arrangement (2:1), deux plans tétraédriques, et un plan octaédrique.....11

Figure 3.1 Influence de la Teneur Initiale en eau sur le Gonflement, et sur le Retrait (D'après CHEN, 1988)..25

FIGURE 3.2 Courbes d'EGales Pressions de Surcharge (KASSIFF et al., 1965).....30

Figure 3.3 Variation du potentiel de gonflement avec l'indice... de retrait (d'après RANGANATHAM et SATYANARAYANA)...31

Figure 4.1 Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédications des Pourcentages de Gonflement Selon les Auteurs Cités Dans la Légende...47

Figure 4.2 Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédications des Pourcentages de Gonflement Selon les Auteurs Cités Dans la Légende...47

Figure 4.3 Variation du Pourcentage de Gonflement, Prédit par le Modèle de NAYAK et CHRISTENSEN, en Fonction du Rapport (C/w₀).....53

Figure 4.4 Variation du Pourcentage de Gonflement, Prédit par

le Modèle (1) de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY, en Fonction de la Teneur Initiale en eau.....57

Figure 4.5 Variation du Pourcentage de Gonflement, Prédit par le Modèle de SCHNEIDER et POOR, en Fonction de la Teneur Initiale en eau.....60

Figure 4.6 Variation du Potentiel d'Expansibilité Selon WILLIAMS.....64

Figure 4.7 Prédications du Pourcentage de Gonflement de l'Echantillon 6 (Argile 1), par les Auteurs Cités Dans la Légende, et Résultats de Mesures par Divers Procédures Expérimentales.....70

Figure 4.8 Prédications du Pourcentage de Gonflement de l'Echantillon 6 (Argile 1), par les Auteurs Cités Dans la Légende, et Résultats de Mesures par Divers Procédures Expérimentales.....70

Figure 4.9 Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédications des Pressions de Gonflement Selon NAYAK et CHRISTENSEN, et Selon KOMORNIK et DAVID.....73

Figure 4.10 Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédications des Pourcentages de Gonflement, Après Régressions, Selon les Auteurs Cités Dans la Légende.....81

Figure 4.11 Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédications des Pourcentages de Gonflement, Après Régressions, Selon les Auteurs Cités Dans la Légende.....81

Figure 4.12 Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédications des Pressions de

Gonflement, Après Régressions, Selon les Auteurs

Cités Dans la Légende.....91

TABLE DES MATIERES



1 INTRODUCTION.....	1
2 LES MINERAUX ARGILEUX EXPANSIFS.....	4
2.1 INTRODUCTION.....	4
2.2 FORMATION des MINERAUX ARGILEUX.....	5
2.3 INTERACTIONS ELECTRIQUES et ECHANGE de CATIONS.....	6
2.4 STRUCTURE des ARGILES.....	8
* Les Phyllosilicates.....	9
* Groupe de la Kaolinite.....	10
* Les Serpentes.....	11
* Groupe des Pyrosilicates et du Talc.....	11
* Groupe des Smectites.....	12
* Groupe des Vermiculites.....	12
* Groupe du Mica.....	13
* Les Chlorites.....	13
* Minéraux Argileux Interstratifiés.....	14
2.5 CONCLUSION.....	14
3 REVUE DES METHODES DE PREDICTION DU GONFLEMENT DES SOLS EXPANSIFS.....	17
3.1 INTRODUCTION.....	17
3.2 PREDICTION du GONFLEMENT.....	18
3.2.1 Préambule.....	18
3.2.2 Influence de la Teneur en eau sur le Gonflement.....	19
3.2.3 Nature du Sol.....	24
3.2.4 Poids Spécifique.....	28
3.2.5 Temps de Gonflement.....	32
3.2.6 Discussion sur les Méthodes de prédiction du Gonflement.....	33
4 PREDICTION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT.....	42
4.1 INTRODUCTION.....	42
4.2 INTERPRETATION des RESULTATS de PREDICTION.....	44
4.2.1 Pourcentage de Gonflement.....	48
4.2.1.1 Méthodes Sur-estimant le Pourcentage de Gonflement.....	49

4.2.1.2 Méthodes Sous-estimant le Pourcentage de Gonfle- ment.....	61
4.2.1.3 Méthodes Intermédiaires.....	62
4.2.1.4 Comparaison des résultats de Prédiction aux Mesures Expérimentales par Divers Procédures.....	68
4.2.2 Pression de Gonflement.....	71
4.3 ANALYSE REGRESSIVE des METHODES de PREDICTION DU POTENTIEL de GONFLEMENT.....	77
4.3.1 Introduction.....	77
4.3.2 Interprétation des Résultats après Régression.....	79
4.3.2.1 Pourcentage de Gonflement.....	79
4.3.2.2 Pression de Gonflement.....	90
5 CONCLUSION GENERALE.....	95
5.1 INTRODUCTION.....	95
5.2 RECAPITULATION et RECOMMANDATIONS.....	96
5.2.1 Prédiction du Pourcentage de Gonflement.....	99
5.2.2 Prédiction de la Pression de Gonflement.....	99
6 BIBLIOGRAPHIE.....	102

الرسالة المحضرة عبارة عن دراسة انتقادية و مقارنة التقنيات مختلفة للتنبؤ بالانتفاخ التربة الطينية المتمددة. التقنيات المقدمة مطبقة على تربة منطقة عين أمناش المشهورة بالانتفاخها عند ارتفاع الرطوبة .

باعتبار بعض المميزات الفيزيائية البسيطة التربة تتوقع بعض التقنيات نسبة الانتفاخ التربة و يقدر البعض الآخر ضغط الانتفاخ. إحدى التقنيات المقدمة تتوقع التمدد.

سمحت الدراسات الحالية بتفصيل بعض الطرق عن البعض الآخر باعتبار بساطتها و دقة نتائجها التنبؤية مقارنة بالقياسات المخبرية و بالملاحظات الحقلية.

أجريت علوة على ما سبق دراسة تحليلية بهدف تكيف الطرق المتروسة على تربة عين أمناش. سمحت هذه الدراسة بأعطاء إرشادات من شأنها تحسين النتائج المستطردة.

ABSTRACT.

The present report is a critical, and a comparative study of different swelling prediction techniques of expansive clays. The presented techniques are applied to IN-AMENAS soils which are very known by their swelling behaviour.

On the basis of some elementary soil physical properties, certain techniques predict the percentage swell, others the swelling pressure. One of the presented techniques predicts both of these characteristics.

The present study has permitted to favour some techniques rather than others, Considering their simplicity, and the accuracy of their results.

Moreover, a regression analysis, for optimisation of the stated models coefficients, has been made. This analysis has permitted proposal recommendations to improve the predicted results.

RESUME.

Le présent rapport est une étude critique, et comparative de différentes techniques de prédiction du gonflement des argiles expansives. Les techniques présentées sont appliquées aux sols de la région d'IN-AMENAS, très célèbres par leur comportement expansif.

Sur la base des caractéristiques physiques élémentaires du sol, certaines techniques prévoient le pourcentage de gonflement, d'autres la pression de gonflement. L'une des techniques présentées prévoit les deux grandeurs.

La présente étude a permis d'avantager certaines techniques par rapport à d'autres, à l'égard de leur simplicité, et de l'exactitude de leurs résultats.

Par ailleurs, une analyse d'optimisation, des coefficients des modèles étudiés, a été menée. Celle-ci a permis la mise au point de certaines recommandations pouvant améliorer, davantage, les résultats de prédiction.

CHAPITRE 1
INTRODUCTION



La mécanique des sols, science axée sur l'expérimentation, et développée depuis près d'un siècle, n'échappe pas à l'estimation, à l'approximation, et aux interprétations parfois délicates et difficiles à admettre. La réflexion, la prudence et la patience sont primordiales car cette science est, avant tout, un art. Cependant, les moyens modernes de calculs, ainsi que les sciences de l'ingénieur et les sciences fondamentales sont indispensables car elles constituent des outils d'études et d'analyses.

La mécanique des argiles gonflantes suit aujourd'hui une voie plutôt analytique où sont fusionnées des connaissances théoriques, des moyens automatiques de calcul, ainsi que l'expérience acquise au cours des années.

Dans un tel champ ouvert pour la recherche, la rigueur est de taille. En effet, plusieurs phénomènes physiques peuvent présenter des symptômes semblables, voire même identiques. Cependant, l'évolution des techniques d'identification, et d'élimination promet beaucoup d'espoirs, et mérite, par conséquent, d'être soutenue et développée.

En génie civil, le concepteur a, souvent, besoin d'avoir une idée sur le comportement de la structure après construction. C'est, dans la plus part des cas, à l'ingénieur de sol de répondre à ce besoin. Il est difficile, aussi bien du point de vue calculs que responsabilité, de concevoir une structure pour laquelle la manière dont elle sera sollicitée et, par suite, la manière dont elle répondra à ces sollicitations est complètement (ou partiellement) ignorée.

Une structure reposant sur un sol gonflant est sujette à des sollicitations de soulèvement, à des mouvements différentiels, et à

cette structure a, alors, besoin de connaître, le plus exactement possible, tous les paramètres de gonflement en terme de contraintes, et/ou de déformations. Une fois ces paramètres pris en compte, la structure bâtie s'adaptera, probablement, mieux au mouvement du sol.

Malheureusement, dans la plus part des cas la réponse à cette question n'est pas simple. En effet, si les paramètres sont déterminés au laboratoire, un problème de simulation se poserait du fait que les conditions du site ne sont pas toujours reproductibles au laboratoire. La reproductibilité englobe tout ce qui touche aux conditions de chargement, conditions aux limites, conditions initiales, conditions naturelles qui renferment, à leur tour, les conditions d'inondation, et les conditions climatiques. En plus de toutes ces contraintes s'ajoute le problème de représentativité de l'échantillon de sol. La représentativité est fonction des dimensions de l'échantillon de sol, et des conditions d'échantillonnage.

Une réponse à la question du concepteur pourrait être apportée par une approche empirique, ou semi-empirique. Dans ce cas, des modèles de prédiction des grandeurs recherchées, compte tenu de certaines conditions du milieu, sont nécessaires.

Cette façon de procéder présente deux principaux avantages :

- 1) les méthodes de prédiction nécessitent la connaissance de certaines caractéristiques physiques du sol, ces dernières sont généralement facilement déterminables comme celles requises pour l'identification du sol, et pour sa classification. Par conséquent, les méthodes prévisionnelles sont plus faciles que les méthodes de mesures directes.
- 2) en tenant compte des caractéristiques d'un sol expansif, les méthodes de prédiction du potentiel de gonflement (pourcentage, et/ou pression de gonflement) permettent, à chaque application, de vérifier la validité des relations

entre le potentiel de gonflement, et les caractéristiques physiques du sol.

Dans le monde, plusieurs méthodes de prédiction du potentiel de gonflement des sols existent. Certaines d'entre elles sont théoriques, cependant, la plus part sont empiriques. Dans le présent travail de recherche, le potentiel de gonflement du sol expansif du site d'IN-AMENAS est prédit, compte tenu des caractéristiques physiques, et mécaniques, du sol.

La présente étude consiste, globalement, en:

- 1) une revue des différents modèles de prédiction du pourcentage, et de la pression de gonflement des sols expansifs,
- 2) une étude de l'applicabilité de ces méthodes aux sols étudiés en tenant compte des particularités de chacune d'elles,
- 3) une discussion des résultats de prédiction obtenus par les différentes méthodes,
- 4) une procédure à un ajustement des méthodes empiriques aux sols étudiés,
- 5) Un choix éventuel d'une (ou de plusieurs) méthodes qui prédit, le mieux possible, les grandeurs recherchées.

Les sols expansifs étudiés proviennent de la région d'IN-AMENAS, où des désordres extraordinaires ont été observés sur les constructions. A IN-AMENAS, le gonflement du sol présente le plus grand obstacle handicapant l'exploitation pétrolière et le traitement de la matière première. Le complexe de raffinage du pétrole, sis à IN-AMENAS, constitue un excellent exemple illustrant les désordres résultant du gonflement des argiles.

CHAPITRE 2

LES MINÉRAUX ARGILEUX EXPANSIFS

2.1 INTRODUCTION.

En mécanique des sols, la plus part des systèmes de classification des sols définissent, arbitrairement, la particule argileuse comme celle ayant un diamètre "effectif" inférieur ou égale à 2 microns. Cependant la dimension d'une particule argileuse ne définit pas le minéral qui la constitue. En minéralogie, les sols fins sont, souvent définis par leur dimension, et leur composition minéralogique (GILLOTT, 1987).

La particule argileuse est formée essentiellement de minéraux argileux dérivant d'une altération de roches mères. Dans le cas des particules de faibles dimensions, l'interaction électrique à leurs surfaces est relativement plus importante que la force gravitationnelle.

En minéralogie des argiles, la montmorillonite, la kaolinite et l'illite sont le plus souvent comparées pour mettre en évidence certains effets tels que l'histoire de formation et les interactions entre les minéraux au sein d'un même sol. La montmorillonite est le minéral argileux présentant les plus gros problèmes d'expansion des sols.

L'adsorption de l'eau par les minéraux argileux est à la base de leur gonflement. D'un point de vue minéralogique, l'amplitude du gonflement dépend de la nature du minéral, de la quantité de minéraux argileux présents, de la nature des ions échangeables, de la nature du fluide interstitiel et, de la structure interne.

L'identification du minéral argileux peut aider à prévoir un éventuel problème de gonflement. Cependant, cette analyse ne suffit pas pour affirmer l'existence d'un gonflement. La minéralogie de l'argile n'est pas, nécessairement, corrélée à l'amplitude du

gonflement observé. L'identification minéralogique donne une idée sur la texture, le mode de formation, les proportions des différents minéraux au sein d'un même sol, ainsi que l'éventuelle réaction du sol vis à vis des conditions de l'environnement (chargement, écoulement, ...). Cependant cette analyse minéralogique n'est faite que si ces renseignements sont, impérativement, nécessaires étant donné son coût excessif par rapport à d'autres analyses courantes d'identification, et vu l'encombrement des équipements nécessaires pour sa faisabilité. Le coût et la difficulté de l'analyse minéralogique limitent l'utilisation de celle-ci comme essai courant dans le domaine de la construction.

2.2 FORMATION DES MINÉRAUX ARGILEUX.

La formation des minéraux argileux est un processus très compliqué dans lequel interagissent plusieurs minéraux parents. Parmi les minéraux parents se distinguent le feldspath, le mica et les minéraux à base de chaux. Le processus d'altération englobe la désintégration, l'oxydation, l'hydratation et le lessivage.

TOURTELOT (1973) montre que la formation de la montmorillonite nécessite une extrême désintégration, une forte hydratation et un lessivage restreint de sorte que le magnésium, le calcium, le sodium et le fer puissent, tous, interagir dans le système d'altération. La formation des minéraux montmorillonitiques est favorisée par un environnement alcalin, par la présence d'ions magnésium et par un défaut de lessivage. De telles conditions sont réunies dans les régions semi-arides où la pluviométrie est, relativement, faible et où l'évaporation est très intense, et où la pluviométrie est faible. Les minéraux parents nécessaires pour la formation de la montmorillonite sont, le plus souvent, le ferromagnésium, les feldspaths calciques, le verre volcanique et d'autres roches volcaniques. La bentonite est une roche composée essentiellement de montmorillonite ayant été formée par altération chimique de cendres volcaniques.

2.3 INTERACTIONS ELECTRIQUES et ECHANGES de CATIONS.

Les minéraux argileux possèdent la propriété d'interagir avec les cations (ou les anions). Les ions échangeables sont pris autour de la surface extérieure, de l'unité structurale du minéral argileux, cependant, la réaction d'échange n'affecte pas la structure d'ensemble des minéraux. Dans les minéraux argileux, les cations échangeables les plus connus sont le calcium (Ca^{++}), le magnésium (Mg^{++}), l'hydrogène (H^+), le potassium (K^+), le nitrate (NH_4^+) et le sodium (Na^+).

L'existence d'un ordre préférentiel d'attraction est dicté par la faculté de l'argile d'attirer des ions dans une solution. Du fait que dans une solution ionique les cations sont attirés vers un minéral argileux. Le minéral est, par conséquent, chargé négativement à sa surface. Les résultats des analyses de la structure d'un minéral argileux isolé est en parfaite conformité avec cette déduction.

Les cations fixés à la surface du minéral argileux peuvent être substitués par d'autres cations selon la nature du fluide interstitiel, le processus de remplacement des cations est, techniquement, appelé l'échange de cations (GRIM, 1968).

La capacité d'échange de cations est la charge électrique d'attraction de cations par unité de masse, elle est exprimée en milliequivalents par 100 grammes de sol.

Des intervalles typiques de capacités d'échanges de différents minéraux argileux sont donnés dans le tableau (2.1). La capacité d'échange est déterminée par mesure de la différence de concentrations entre l'état initial et l'état final d'une réaction de lavage.

Tableau 2.1. Intervalles de capacités d'échange de cations de différents minéraux argileux (d'après WOODWARD-CLYDE et Associés, 1967).

Minéral argileux	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Épaisseur de la particule (μ)	0.5-2	0.003-0.1	< 0.5A°
Diamètre de la particule (μ)	0.5-4	0.5-10	0.05-10
Surface spécifique (m ² /g)	10-20	65-180	50-840
Cap. échan. cations (m. équival/100g)	3-15	10-40	70-80

Sur le tableau (2.1), il est, aisément, visible que les montmorillonites sont dix fois plus actives que les kaolinites dans leur pouvoir d'absorption des cations. Ceci est dû à la charge négative, nettement supérieure, portée par la particule de montmorillonite et à sa grande surface spécifique.

Certaines relations existent entre des propriétés du sol, telles que les limites d'ATTERBERG, le type de minérale argileux et la nature de l'ion adsorbé. Le tableau (2.2) indique la limite de liquidité et l'indice de plasticité de chaque groupe de minéraux argileux.

L'examen des tableaux (2.1) et (2.2) montre que la capacité d'échange de cations d'une argile est en relation étroite avec les limites d'ATTERBERG. Plus la capacité d'échange de l'argile est grande, plus l'effort nécessaire, pour changer un cation adsorbé, est grand. Le principe de base pour la stabilisation chimique des sols expansifs est l'augmentation de la concentration ionique de l'eau libre et l'atténuation du phénomène d'échange.

Tableau 2.2. Valeurs des limites d'ATTERBERG de différents minéraux argileux, avec différents cations adsorbés.

Minéral argileux	Na ⁺		K ⁺		Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺	
	Wl %	Ip %	Wl %	Ip %	Wl %	Ip %	Wl %	Ip %
Kaolinite	29	1	35	7	34	8	39	11
Illite	61	27	81	38	90	50	83	44
Montmorillonite	344	251	161	104	166	101	158	99

2.4 STRUCTURE des ARGILES.

PHILIP LOW (1973) a mis en évidence les deux structures moléculaires fondamentales constituant l'édifice argileux: le tétraèdre silicaté et l'octaèdre aluminé.

Le tétraèdre silicaté consiste en un atome de silicium entouré de quatre ions oxygène (figure (2.1.a)). L'octaèdre aluminé consiste en un atome d'aluminium entouré de six ions oxygène (figure (2.1.b)).

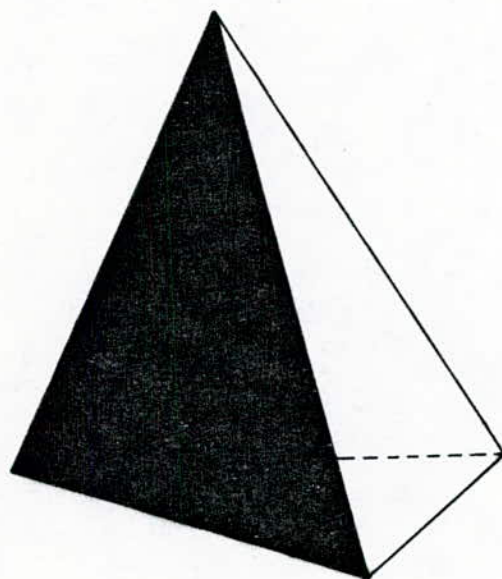


Figure 2.1.a: structure tétraédrique d'un minéral argileux.

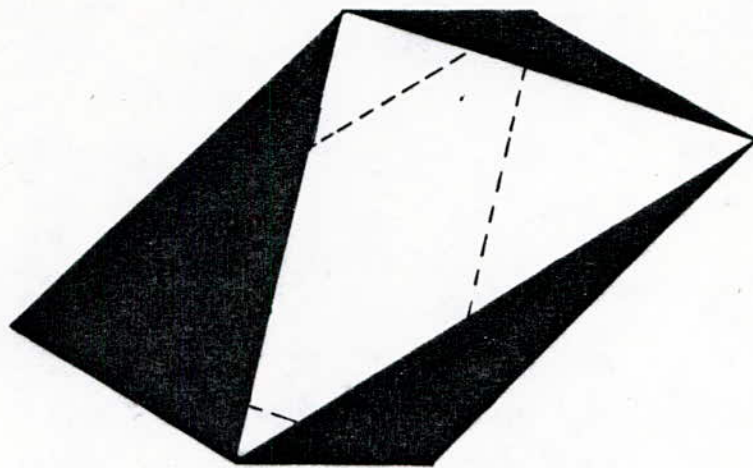


Figure 2.1.b: structure octaédrique d'un minéral argileux.

Les unités tétraédrique et octaédrique sont combinées pour former les unités structurales de base des particules argileuses. Les minéraux argileux diffèrent, donc, par leur type d'arrangement et par leur configuration spatiale. Les minéraux argileux constitués à la base d'unités tétraédriques et octaédriques sont:

*** Les Phyllosilicates.**

Les minéraux les plus rencontrés dans les argiles sont classés dans ce groupe et ont une structure en feuillets. Ils sont formés des deux éléments de base: le tétraèdre silicaté (SiO_4) et l'octaèdre à base de magnésium ou à base d'aluminium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$ respectivement).

Le développement structurel des feuillets de minéraux silicatés est généré par assemblage d'éléments octaédriques et tétraédriques, formés par les oxygènes des éléments tétraédriques. La combinaison d'un plan octaédrique et d'un plan tétraédrique donne lieu à une unité structurale dite: 1:1, (figure 2.2); c'est la structure de

base du groupe de minéraux kaolinite-serpentine. Si une seconde couche tétraédrique est ajoutée d'une manière similaire du côté opposé, l'unité structurale de base sera dite: 2:1. Dans ce cas précis, un plan octaédrique est pris, en sandwich, entre deux plans tétraédriques (figure 2.3). Cet arrangement d'éléments est celui du groupe des pyrophyllites, de la smectite-vermiculite et du mica.

*** Groupe de la Kaolinite.**

L'unité de base de ce groupe est le plan silicaté (1:1). Les espèces importantes ressemblant à la kaolinite et faisant partie du même groupe sont la Nacrite, la Dickite et la Halloysite.

En utilisant le microscope électronique à balayage (MEB), Keller et Haenni (1978) ont remarqué l'existence d'au moins deux minéraux kaoliniques, aplatis et allongés, ceci est d'autant plus visible que l'échantillon étudié provient d'un gisement résiduel. La distinction entre ces deux sous groupes est notée au niveau de la cristallographie, la composition chimique et le comportement mécanique.

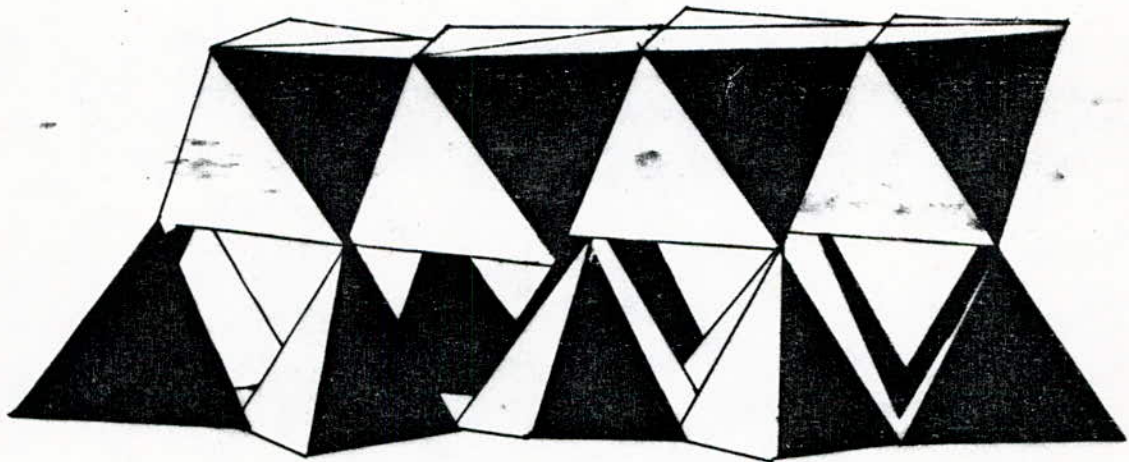


Figure 2.2: Arrangement (1:1), un plan tétraédrique et un plan octaédrique.

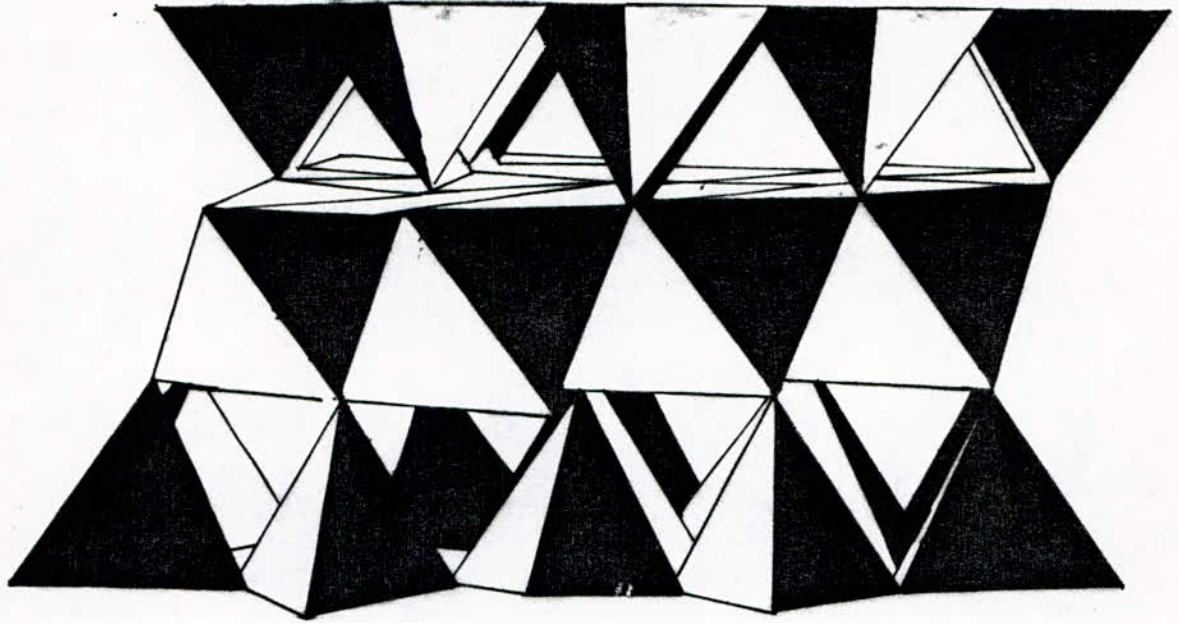


Figure 2.3: Arrangement (2:1), deux plans tétraédriques entourant un plan octaédrique.

La formation de la kaolinite, au dépend des minéraux primaires, est favorisée par les conditions acides d'un environnement humide ou hydrothermale.

* Les Serpentes.

Les serpentes sont des ensembles de groupes de minéraux (Chrysolite, Lizardite et Antigorite) à structure (1:1) et configuration géométrique trioctaédrique. Les serpentes se présentent en forme fibreuse, aplatie, tubulaire ou litée.

* Groupe des Pyrophyllites et du Talc.

Les pyrophyllites sont des minéraux stratifiés à structure (2:1). Dans la matrice des pyrophyllites il y a très peu, ou pas du tout, de substitutions de Silicium par de l'Aluminium et pas d'excès de charges négatives sur le cristal, ce qui ne nécessite pas d'apport de cations pour neutraliser et stabiliser le minéral. Les

minéraux sont reliés entre eux par les ponts de VAN DER WAALS, des modifications de structure sont possibles par déplacement relatif des couches.

Le talc est similaire, dans sa structure, aux pyrophyllites, les cavités octaédriques sont cependant toutes occupées par des ions magnésium (Mg^{++}). Le minéral est trioctaédrique et ne possède presque pas de charges sur ses couches.

Les minéraux tels que le talc et les pyrophyllites se développent généralement sous des conditions de métamorphisme à basse température.

* Groupe des Smectites.

les smectites sont des minéraux silicatés à structure (2:1). D'un point de vue propriétés physiques et reconnaissance analytique, les smectites se distinguent par une variation des espaces interfeuilletés en présence d'eau ou d'un quelconque liquide organique. Les liaisons interfeuilletés étant assez faibles, la prise d'eau est accompagnée d'une grande augmentation de volume et de génération d'importantes pressions de gonflement.

* Groupe des Vermiculites.

La structure fondamentale des vermiculites est similaire à celle des minéraux phyllosilicatés (2:1). Beaucoup d'auteurs considèrent que les vermiculites se forment à partir de l'altération de la muscovite, de la biotite et d'autres phyllosilicates.

Dans la vermiculite à base de magnésium, les ions magnésium sont entourés de deux plans de molécules d'eau. L'eau et les ions magnésium sont liés et orientés d'une manière appropriée sous l'effet des forces de polarisation, mais il existe un excès d'eau qui n'est pas liée aux cations, cette dernière est expulsée lorsque le minéral est chauffé et l'espace entre feuilletés décroît par

déshydratation. D'une façon générale, les smectites diffèrent des vermiculites par une plus faible charge électronique à la surface des feuillets et par leurs substitutions organiques mal ordonnées.

* Groupe du Mica.

La structure de base des minéraux de ce groupe consiste en une formation (2:1) dans laquelle deux éléments tétraédriques d'oxyde silicaté (dirigé vers l'intérieur) renferment, entre eux, un élément octaédrique. Il existe des micas dioctaédriques et des micas trioctaédriques. L'énergie de liaison entre-feuillets du mica dioctaédrique a été évaluée et trouvée plus importante que celle du mica trioctaédrique même si la charge du feuillet est la même (GIESE, 1977). Le minéral le plus rencontré dans les dépôts argileux est du type mica-potassique.

* Groupe des Chlorites.

Dans le minéral de chlorite, un plan octaédrique additionnel vient s'imbriquer entre deux plans (2:1). L'unité structurale de base des chlorites contient, donc, un plan (2:1) et une couche d'ions hydroxyles. Les couches silicatées (1:1) ont une épaisseur de 7Å ; dans les plans (2:1), la même grandeur vaut 10Å . Dans les chlorites, l'épaisseur de plan est de 14Å , les minéraux ayant la même composition structurale que les chlorites sont, d'ailleurs, nommés les minéraux à 14Å . L'épaisseur de couche des différents minéraux est déterminée par analyse de diffraction aux rayons X, cette dernière a été adoptée comme critère de classification des minéraux silicatés en types. Dans ces minéraux, la structure de la couche alumino-silicatée est identique à celle trouvée dans les minéraux (2:1) décrite antérieurement. Cependant, les couches de minéraux sont régulièrement intercalées par des feuillets de cations liés, dans une matrice octaédrique, à des ions hydroxyles. Les cations en question sont généralement Mg^{++} ou Al^{3+} . Les chlorites diffèrent des vermiculites du fait que les ions magnésium soient liés à des hydroxyles plutôt qu'à des molécules d'eau, c'est

pourquoi le feuillet d'hydroxydes est mieux formé et est plus complet. Les appellations courantes des différentes variétés de chlorites sont:

- le Climochlore si le minéral dominant est le magnésium (Mg),
- la Chamosite si le minéral dominant est l'ion ferreux (Fe),
- la Nimité si le minéral dominant est le nickel (Ni), et
- la Pennantite si le minéral dominant est l'ion Manganèse (Mn).

Toutes les autres appellations ne sont que des synonymes de celles-ci (BALLEY et al., (1979), BAYLISS, (1975)).

Les chlorites, dans leur état stable (conditions normales de température et de pression), possèdent un espacement unitaire de leur configuration la plus élémentaire égale à 14\AA , c'est pourquoi elles sont qualifiées de "gonflantes" lorsqu'elles réagissent avec du glycérol.

* Minéraux Argileux Interstratifiés.

La structure de base de plusieurs minéraux argileux est telle que plusieurs types de formations est mis en commun. Les minéraux possédant de telles intersratifications sont qualifiés de minéraux à couches mixtes. L'enchevêtrement peut être régulier ou irrégulier. Les minéraux argileux avec stratifications irrégulières sont généralement rencontrés dans les profondeurs de bassins de sédimentation (WEAVER, 1956).

2.5 CONCLUSION.

A l'issue de l'examen des minéraux argileux les plus courants, et ceux posant des problèmes de gonflement des sols, il est retenu que le mécanisme d'absorption d'eau par les argiles gonflantes est en parfaite conformité avec la théorie de la double couche qui rapporte que, dans une solution aqueuse, l'eau naturelle se comporte comme un dipôle électrique. Les particules argileuses sont formées de minéraux superposés dans un réseau maillé. Les

particules argileuses présentent un excès de charges négatives distribuées sur leur surface, cet excès de charges est dû à la rupture du réseau cristallin dans l'espace. Les molécules d'eau, sous forme de dipôles électriques, viennent se fixer à la surface des particules, c'est l'eau adsorbée ou l'eau liée. Le pôle positif de la molécule d'eau étant dirigé vers la particule argileuse et le pôle négatif vers l'extérieur.

Les cations restant dans la solution viendront se fixer sur les pôles négatifs de l'eau liée, cependant, ces cations restent dans un état échangeable si, ultérieurement, des cations plus électropositifs se présentent dans la solution. L'ensemble de la couche d'eau adsorbée et la nappe de cations fixés dessus est appelé double couche.

Les cations échangeables sont, selon leur charge et leur diamètre, soit localisés au niveau de points nodaux sur la couche d'eau, soit répartis de manière plus ou moins uniforme. C'est pourquoi il est, parfois, entendu le terme double couche diffuse. Macroscopiquement analysée, la théorie de la double couche induit des comportements de sols très remarquables.

Si les cations échangeables sont fixés de manière préférentielle sur les points nodaux, la pression osmotique présentera, elle aussi, un aspect d'intensités localisées, ce qui veut dire que l'eau adsorbée est retenue sous forme d'agglomérations ponctuelles.

Si, par contre, les cations échangeables sont uniformément répartis sur la couche d'eau liée, la pression d'osmose sera répartie identiquement, ce qui induit une meilleure distribution de la succion de l'eau.

De manière générale, c'est les ions bivalents ou trivalents qui correspondent au premier cas et les ions monovalents au second.

En pratique, plusieurs phénomènes naturels sont influencés, en grande partie, par ce mécanisme d'adsorption ionique. Parmi ces

phénomènes physiques, le cas suivant peut servir d'exemple.

Dans le domaine du génie civil, l'expérience montre que les sols expansifs à couches ioniques bivalentes gonflent de manière plus spectaculaire que ceux à couches monovalentes. Cette différence de gonflement est explicable du fait que les premiers sols absorbent des quantités d'eau plus importantes par rapport aux seconds. Cependant, le gonflement des sols à couches ioniques monovalents est très variable selon les conditions d'humidification. L'eau adsorbée par les sols à couches ioniques bivalents, est fortement retenue. Dans le cas des sols monovalents, les forces d'adsorption sont faibles. Les variations de volume du sol, pour une série de périodes sèches-humides, sont moins importantes dans le cas des sols bivalents que dans les sols monovalents, ceci parce que les variations de teneur en eau sont plus importantes.

De ce fait, les sols monovalents sont très actifs dans les régions à climat tempéré et induisent le plus souvent d'importants désordres aux structures. C'est pourquoi les sols gonflants sont parfois stabilisés par humidification permanente.

CHAPITRE 3
REVUE DES METHODES DE PREDICTION
DU GONFLEMENT DES SOLS EXPANSIFS

3.1 INTRODUCTION.

Le présent chapitre est une étude synthétique de treize méthodes de prédiction de l'amplitude de gonflement, et de quatre méthodes de prédiction de la pression de gonflement des sols expansifs. Cette synthèse documentaire est présentée sous forme de revue, discussion, critique et recommandation concernant chaque étude.

Dans ce chapitre, chaque méthode est revue et étudiée à part, l'ensemble des travaux entamés dans un même cadre est discuté de sorte à comparer les hypothèses et les résultats trouvés par l'ensemble des méthodes. Etant donné les différences entre les hypothèses entre les modèles, ainsi qu'entre les lois régissant chaque méthode de prédiction, il n'est pas évident de favoriser certains par rapport à d'autres, cependant, la simplicité d'un modèle, et la qualité de ses résultats peuvent dicter sa sélection. La prédiction du gonflement d'un sol expansif est un sujet non encore maîtrisé dans le monde, c'est pourquoi il est question de tenir compte du cadre dans lequel chaque modèle a été développé. Le présent chapitre constitue donc une analyse de chaque méthode de prédiction du gonflement d'un sol expansif, et une synthèse de celles-ci.

Les chercheurs, de manière générale, s'entendent sur le fait que le gonflement des sols expansifs est affecté par les conditions de l'environnement. Il est évident que si les conditions du milieu, d'un site donné, ne varient pas, il n'y aura pas de variation de volume du sol.

Parmi les sols rencontrés dans le domaine de la construction,

certains se distinguent par leurs facultés au gonflement lorsqu'ils sont mis au contact de l'eau. Beaucoup d'études sont menées pour réduire ce gonflement.

Les dommages causés aux structures par suite de gonflement du sol ont été recensés pendant plusieurs années et dans plusieurs régions du monde. La littérature présente diverses techniques de mesure, divers modèles de prédiction, ainsi que des études de nombreux paramètres susceptibles d'affecter le gonflement.

3.2 PREDICTION du GONFLEMENT.

3.2.1 Préambule.

Les conditions du milieu regroupent tout ce qui pourra altérer l'état du sol, parmi celles-ci ANDRE, ATHANASIU, et MANEA (1980) distinguent:

- * la quantité et le type d'élément argileux,
- * les conditions initiales de l'échantillon de sol,
- * l'histoire des contraintes,
- * la nature du fluide interstitiel,
- * la température,
- * la forme, la grandeur, et l'épaisseur de l'échantillon de sol,
- * la durée du phénomène.

Dans le monde, les auteurs admettent (ANDRE, ATHANASIU, et MANEA (1980)) que le comportement des sols expansifs dépend étroitement des conditions climatiques du site. En effet, si les conditions climatiques varient, le sol expansif du site considéré réagit soit par un gonflement soit par un retrait par rapport à son état précédent. Si, par exemple, les chutes de pluies sont quasi-permanentes sur un site donné, les risques de dommages par gonflement du sol ne seront pas à craindre même si ce dernier est potentiellement expansif.

3.2.2 Influence de la Teneur en eau sur le Gonflement.

Les chercheurs montrent que le gonflement est inversement proportionnel à la teneur naturelle en eau. Un sol gonflant, initialement humide, présentera un gonflement faible lorsqu'il est mis en contact de l'eau car son affinité à l'eau est déjà satisfaite en partie. La teneur en eau est reconnue comme un paramètre important contrôlant le gonflement des sols.

L'augmentation de la teneur en eau est à la base du gonflement des sols car elle favorise d'une part la rupture des liaisons entre les feuillets d'argiles résultant, ainsi, en une augmentation du volume d'une même particule, et d'autre part à l'affaiblissement des forces de capillarité résultant, alors, en un éloignement des particules les unes des autres. Une légère variation de teneur en eau (de l'ordre de 2% à 3%) est parfois suffisante pour causer un gonflement assez important (CHEN, 1988).

Que l'échantillon de sol soit à l'état intact ou remanié sa teneur initiale en eau affecte l'amplitude du gonflement. Pour une même variation de teneur en eau, plus la teneur initiale en eau est petite, plus le gonflement est grand. La relation entre la teneur en eau initiale et le potentiel de gonflement des sols de la région du Texas a été étudiée par SEED (1962). La relation entre la variation de la teneur en eau, et le pourcentage de gonflement est, toujours, vérifiée dans l'intervalle des teneur en eau supérieures à la limite de retrait.

Les mécaniciens des sols, et les géologues minéralogistes considèrent le gonflement des sols expansifs de deux vues différentes:

les mécaniciens des sols considèrent que le paramètre le plus important pouvant être corrélé au potentiel de gonflement est l'indice de retrait du fait que, d'une part, la limite de retrait est la teneur en eau au-dessous de laquelle il n'y a plus de

variation de volume de l'échantillon de sol malgré la diminution de la teneur en eau, et que d'une autre part, la teneur en eau, à l'équilibre, de la plus part des sols plastiques mis en contact d'eau, est sensiblement égale à la limite de liquidité lorsqu'aucun confinement n'est appliqué au sol (RANGANATHAM et SATYANARAYANA, 1965). En outre, les sols, dont la teneur en eau est supérieure à la limite de liquidité, présentent des défauts de stabilité vis à vis des constructions (glissements, écoulements, rupture sous l'effet de vibrations et de chocs), ces sols sont le plus souvent évités ou traités selon le cas. Les sols dont la teneur en eau se situe dans l'intervalle de l'indice de retrait sont actifs.

KOMORNIK et DAVID (1969) affirment que les sols, en général, sont constitués de minéraux argileux, tels que la Kaolinite, la Montmorillonite, et les illites, et de minéraux non argileux tels que le Quartz. Les particules, à base de l'un ou l'autre type de minéral, diffèrent par leurs formes et leurs surfaces spécifiques.

Dans les sols fins (20% à 30% d'argile), les forces d'attraction et de répulsion électriques peuvent causer des variations de volume, alors que dans les sols grenus, une variation de volume est plutôt le résultat d'une interaction mécanique entre les particules: réarrangement des grains, effets des forces de contact solide-solide. Les forces électriques entre les particules sont fonction de l'état de compacité, de l'orientation des particules, de la nature, et de la concentration ionique du fluide des pores.

Il est généralement reconnu que le gonflement des sols argileux est lié à la teneur en eau. ANDRE, ATHANASIU et MANEA (1980) constatent que les sols expansifs de Palestine s'arrêtent de gonfler avant d'atteindre l'état de saturation. Cependant les travaux de MARIOTTI (1984) montrent que de manière générale, un sol expansif possède une habilité au gonflement même à teneur en eau de saturation, et que ce n'est pas parce que le sol est rendu saturé qu'il ne gonflera plus.

A propos du gonflement et de la saturation d'un sol expansif, une dépendance directe reliant ces deux grandeurs n'est pas évidente. Un sol expansif peut gonfler même après saturation, il peut aussi s'arrêter de gonfler sans atteindre l'état de saturation, comme il peut gonfler tout en approchant l'état de saturation. La notion de saturation ne renseigne que du rapport du volume des vides occupé par de l'eau. Dans un sol expansif, le volume des vides peut augmenter à mesure que ces derniers se remplissent d'eau. Dans ce cas, la teneur en eau de saturation dépendra du pourcentage de gonflement du sol. Il est, par ailleurs, constaté que lorsque le degré de saturation augmente, le sol gonfle progressivement par suite de satisfaction de son affinité à l'eau, cependant, la vitesse de gonflement diminue à mesure que le degré de saturation augmente.

Les géologues minéralogistes considèrent le gonflement comme une réaction de neutralisation des ions échangeables apparaissant à la surface des feuillets d'argile (GILLOTT, 1987). Ils attribuent le gonflement des argiles à la présence de minéraux argileux expansifs qui, une fois réunis avec des cations échangeables hydratés augmentent de volume par adsorption d'eau de manière interparticulaire et/ou interfoliaire. Le gonflement interfolier se manifeste lorsque les feuillets d'argiles s'éloignent les uns des autres par affaiblissement des forces d'attraction les retenant. Cet affaiblissement est dû à une neutralisation ionique des liaisons de VAN DER WAALS. Un gonflement inter-particulaire se traduit par un éloignement mutuel des particules constituant le matériau tout en gardant leurs dimensions initiales. L'analyse minéralogique des sols montre que la Montmorillonite est souvent à la base du gonflement dans les sols expansifs. La Montmorillonite et la Kaolinite sont gonflants, mais de manières différentes. L'examen de ces deux types d'expansions montre que dans le cas de la Montmorillonite, le gonflement est interfolier, et que dans le cas de la Kaolinite, le gonflement est inter-particulaire.

Certains chercheurs ont essayé de mettre en relation les deux vues de sorte à avoir une approche plus générale et plus unifiée. Le but de ces chercheurs est de mettre en corrélation le gonflement des sols et leur propriétés physiques. HOLTZ et GIBBS (1954) classent les sols expansifs en considérant leur gonflement libre et leurs limites d'ATTERBERG. GRIM (1962) a étudié la relation entre le poids spécifique des grains solides d'un sol et leur nature minéralogique, SEED et al. (1962) développèrent le concept du potentiel de gonflement défini comme étant le pourcentage de gonflement sous une charge de 7 Kpa (1Psi) d'un échantillon de sol compacté à la teneur en eau optimale selon la procédure standard A. A. S. H. O. PARCHER et LIU (1965) ont étudiés quelques paramètres liés au gonflement des sols expansifs tels que la texture et la thixotropie. Ces travaux ont contribué à la reconnaissance et à la classification des sols expansifs. Cependant, une classification standard et universelle de ces sols n'existe pas encore. Les ingénieurs de sol ont, pour chaque cas particulier, à faire des essais supplémentaires pour plus de sûreté. Du fait de la diversité des méthodes de reconnaissance des sols expansifs, et de la multitudes des systèmes de classification de leur potentiel de gonflement, il semble être très peu possible de mettre au point une méthode universelle d'identification et de classification des sols gonflants. Il n'est pas impossible de mettre en commun les deux vues précédentes car le gonflement d'un sol argileux, dans un sens physique, est une rupture des liaisons entre les feuillets d'argiles, et un éloignement des particules de sol les unes des autres.

KOMORNIK et DAVID (1969) montrent que la pression de gonflement d'un sol expansif est liée à sa limite de liquidité, à sa teneur initiale en eau, et à sa densité sèche. VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973) montrent que le logarithme du potentiel de gonflement d'un sol expansif décroît linéairement lorsque la teneur initiale en eau de celui-ci augmente.

ABDELMUHSIN.W.DHOWIAN (1990) tient compte de quelques paramètres, facilement déterminables, pour prédire le potentiel de gonflement. Les paramètres nécessaires dans son modèle de prédiction sont:

- la teneur initiale en eau,
- la teneur finale en eau, et
- l'indice de teneur en eau défini par le rapport $(\alpha G_s / 1 + e_0)$ où α est le coefficient de compressibilité volumétrique, G_s le poids spécifique des grains solides.

ABDELMUHSIN.W.DHOWIAN (1990) trouve, pour le cas des sols de plusieurs régions de l'Arabie Saoudite, une relation presque linéaire entre le pourcentage de gonflement et la variation de teneur en eau surtout pour le cas des échantillons intacts, il renseigne en outre que son modèle est valable pour des teneurs en eau (w_i et w_f) supérieures à 20%. Bien que l'approche d'ABDELMUHSIN.W.DHOWIAN (1990) ne fait intervenir qu'un nombre réduit de paramètres, simples à déterminer, les résultats trouvés sont très proches des valeurs mesurées, (pour le cas des sols de l'Arabie SAOUDITE). Le modèle d'ABDELMUHSIN.W.DHOWIAN (1990) considère le gonflement des sols expansifs comme un phénomène purement mécanique, les effets d'interaction électrique entre les particules seraient, implicitement, pris en considération dans les paramètres observés tels que la teneur initiale en eau, la teneur finale en eau, le poids spécifique des particules, et le facteur de compressibilité volumique. Les chercheurs NAYAK et CHRISTENSEN (1971) utilisent l'approche basée sur la théorie de la double couche qui attribue le gonflement des sols expansifs à un éloignement des particules les unes des autres sous l'effet de la pression osmotique. Cette dernière approche considère directement les phénomènes à l'origine du gonflement et a fait l'objet de certains des travaux de BOLT (1956).

POPESCU (1980) affirme qu'il existe un intervalle critique de teneur en eau dans lequel le retrait se manifeste. Au delà de cet intervalle, toute variation de teneur en eau n'induit aucun retrait supplémentaire. POPESCU subdivise le retrait en trois états:

- l'état de retrait initial,
- l'état de retrait normal, et
- l'état de retrait résiduel.

Dans la plus part des cas pratiques, la variation de teneur en eau des sols se manifeste dans l'intervalle critique décrit par POPESCU. L'auteur montre que le gonflement libre, d'un sol étudié, décroît lorsque la teneur initiale en eau augmente. Dans la littérature (CHEN, (1988)), il postulé que le retrait est constant, et est plus faible que le gonflement si la teneur initiale en eau est inférieure à la limite de retrait. Dès que la teneur initiale en eau dépasse la limite de retrait, le retrait décroît à mesure que la teneur initiale en eau augmente. En outre, le retrait décroît avec un taux plus faible que celui du gonflement libre. C'est pourquoi, et avec l'augmentation de la teneur en eau, il est atteint un état pour lequel le retrait est égal au gonflement (point A, figure 3.1). Lorsque la teneur en eau augmente davantage, le retrait devient plus important que le gonflement, mais passe de l'état résiduel à l'état normal. Dans l'état normal, le taux de retrait décroît avec l'augmentation de la teneur initiale en eau. La diminution du taux du retrait est plus importante que la diminution du taux du gonflement, au delà d'un certain point (point B, figure 3.1), le gonflement devient plus important que le retrait. A mesure que le sol est gorgé d'eau, les taux de gonflement et du retrait tendent vers zéro.

3.2.3 Nature du Sol.

Les études antérieures ont permis de constater que les argiles à dominance montmorillonitique gonflent plus que les argiles à dominance kaolinitique, ou illitique. Par conséquent, la nature du minéral argileux affecte sensiblement le potentiel de gonflement. Actuellement, les recherches sont orientées dans le but de mieux connaître la nature des particules constituant un sol gonflant, et leurs interactions avec l'eau.

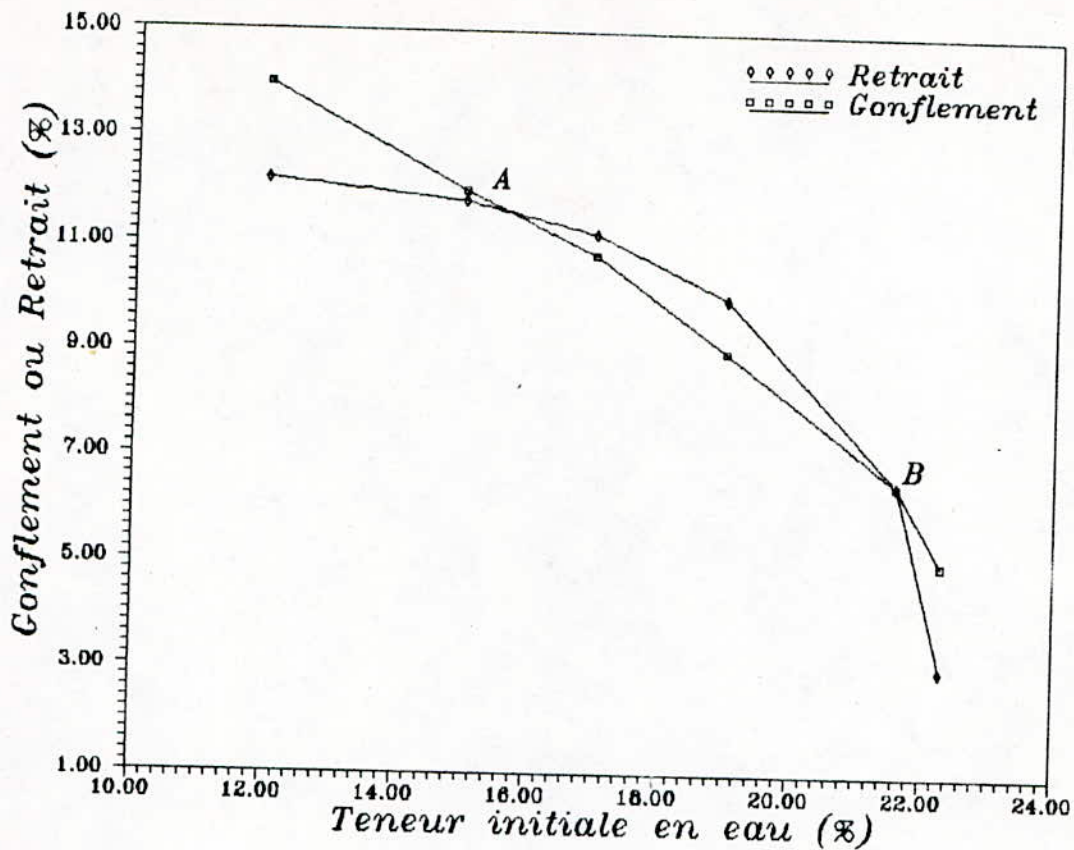


Figure 3.1: Influence de la Teneur Initiale en eau sur le Gonflement, et sur le Retrait (D'après CHEN, 1988).

KOMORNIK et DAVID (1969) admettent que les argiles pures à feuillets parallèles sont telles que le rapport, du coefficient de gonflement sur le coefficient de compressibilité (C_s/C_c), est égal à l'unité. Ce qui implique une réversibilité de la variation de volume de l'échantillon de sol étudié. Les mêmes auteurs ajoutent que le rapport (C_s/C_c) est inférieur à l'unité lorsque l'argile considérée n'est pas pure, ou est à feuillets non parallèles. En pratique, les hypothèses émises ne sont pas toujours vérifiées, c'est pourquoi le rapport C_s/C_c est généralement inférieur à un (KOMORNIK et DAVID, 1969). Le gonflement étant reconnu être plus répandu dans les argiles que dans les sables, KOMORNIK et DAVID (1969) admettent que le rapport C_s/C_c est plus grand dans les

argiles que dans les sables. En considérant ces deux dernières propositions:

* C_s/C_c (sables) < C_s/C_c (argiles), et

* C_c (sables) < C_c (argiles),

il vient que les sables, et les sols grenus de manière générale, sont moins compressibles et moins gonflants que les sols fins (les argiles spécialement). En utilisant l'équation de BOLT (1956), KOMORNIK et DAVID (1969) montrent que le coefficient de compressibilité, des sols de Palestine, varie proportionnellement à la surface spécifique. Les sols étudiés sont de natures variées, Ce qui signifie, entre autres, que les sols grenus sont moins compressibles que les argiles. Cette dernière déduction est constatée dans le pratique.

D'après les résultats exposés par NAYAK et CHRISTENSEN (1971), il apparaît que la corrélation entre les valeurs prévues et les valeurs mesurées des paramètres de gonflement est plus proche d'une droite si la variété du minéral argileux constituant l'échantillon de sol est réduite.

Les études entamées par HOLTZ et GIBBS (1956), SEED et al. (1962) et KASSIFF et al. (1969) ont montré que l'indice de plasticité d'un sol est fonction de la nature et de la proportion des types de minéraux argileux. Les travaux de GRIM (1948) montrent que pour une argile montmorillonitique, le remplacement des ions sodiques par des ions calciques fait varier la limite de liquidité de l'échantillon de sol de 700% à 124% et la limite de plasticité de 97% à 72%. VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973) rapportent qu'il est possible d'assumer que la limite de liquidité d'un sol est représentative du type et de la proportion du minéral argileux présent.

Dans les sols expansifs, une importante partie de la teneur en eau est retenue dans les espaces interfoliés. Cette quantité d'eau dépend essentiellement de la nature et de la proportion des cations

adsorbés et de ceux échangeables. Ceci met, probablement, en évidence la corrélation entre la limite de liquidité d'un sol expansif et le type de cations existants.

Pour des sols de natures minéralogiques différentes, SEED et al. (1962), trouvent une variation linéaire de l'indice de retrait en fonction de la teneur en argile. Un tel résultat est important à prendre en compte car il peut être utilisé pour la prévision du gonflement. L'indice de retrait est proportionnel à la teneur en argile, et la pente de la droite de variation est d'autant plus grande que la proportion de Bentonite est élevée. RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965) définissent l'activité du gonflement comme la pente de la droite de variation de l'indice de retrait en fonction de la teneur en argile. Les auteurs rejoignent l'avis de SEED et al. (1962) sur l'augmentation du potentiel de gonflement avec la teneur en argile. En effet, une faible teneur en argile implique un matériau grossier, généralement à volume des vides important. Par conséquent, le gonflement est encaissé par les vides. RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965) définissent, sur la courbe de variation de l'indice de retrait en fonction de la teneur en argile, un paramètre (n) égal à la teneur en argile pour laquelle l'indice de retrait est nul. Le paramètre n dépend de la nature du sol considéré, pour plusieurs combinaisons et proportions de minéraux argileux, n est généralement compris dans l'intervalle [5%, 13%] (SEED et al., 1962). La faible valeur du paramètre n permet de dire que l'indice de retrait des sols grenus est nul. Ce type de sols peut être rencontré en pratique; les sables grossiers, par exemple, ne possèdent ni limite de liquidité ni limite de retrait. GILLOTT (1987) affirme que le gonflement des sols, dont le pourcentage des inférieurs à 0.2μ est négligeable, est surtout influencé par l'état d'arrangement des grains et par leurs orientations. Dans de tels sols, les effets osmotiques et capillaires sont, relativement, faibles.

Pour les mêmes sols du Black Cotton (sud de l'Inde), le modèle de

RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965) prévoient mieux le potentiel de gonflement que celui de SEED et al. (1962). L'approche de RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965) tient compte directement de la nature minéralogique du sol étudié, la différence entre les deux résultats de prévision met l'accent sur l'importance de la considération de la nature minéralogique du sol pour la prédiction de son gonflement.

3.2.4 Poids Spécifique.

La densité d'un sol est une grandeur qui caractérise l'état de compacité. La densité des sols affecte sensiblement leurs comportements, en particulier les sols compressibles. Pour les sols expansifs, le potentiel de gonflement est directement lié à la densité sèche du fait qu'une densité sèche faible implique un indice des vides important, le gonflement est, par conséquent encaissé, en grande majorité, par les vides, le gonflement apparent est, alors, faible.

L'état physique d'un sol argileux naturel dépend grandement de son histoire des contraintes, de sa teneur en eau, de sa densité et de la présence de fissures au sein du massif. Plus le sol est consolidé ou desséché, plus il est dense. L'augmentation de la densité est, souvent, accompagnée d'une diminution de la teneur en eau. VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973) admettent que pour un sol argileux surconsolidé ou desséché, la densité et la teneur naturelle en eau peuvent être considérées comme représentatives de l'état physique du sol.

Les travaux de KOMORNIK et DAVID (1969), sur les sols gonflant de la Palestine, montrent que la densification d'un échantillon de sol expansif augmente sa pression de gonflement, et son potentiel de gonflement. Des résultats similaires ont été rapportés par MIELENZ et KING (1958). Selon ces derniers, les particules du sol non densifié présentent des orientations arbitraires relativement au

sol densifié. La consolidation du sol augmente le nombre de particules orientées perpendiculairement à la charge extérieure, et réduit la distance entre les particules. La pression de gonflement est, par conséquent, augmentée. Le résultat de cette expérience montre l'influence de la densité initiale sur le potentiel de gonflement. Les sols denses gonflent plus que les sols lâches. La conclusion de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973) est beaucoup retrouvée dans la littérature, et a été rapportée par plusieurs autres chercheurs. La différence entre le pourcentage de gonflement d'un sol expansif dense, et le pourcentage de gonflement du même sol rendu lâche peut donner une idée sur l'état de porosité du sol, et sur le nombre de particules de sol par unité de volume. Cependant, la détermination expérimentale de la densité sèche d'un sol est généralement affectée de beaucoup d'erreurs dues aux défauts de précision dans la détermination des dimensions de l'échantillon de sol. Les sols à fort pourcentage de gonflement sont, de manière générale, à forte pression de gonflement, par conséquent, l'état de densité affecte non seulement le potentiel de gonflement, mais, aussi, la pression de gonflement.

ANDRE, ATHANASIU et MANEA (1980) montrent que lorsqu'une importante charge est appliquée sur les sols de la Palestine (charge nettement supérieure à la pression de gonflement), ceux-ci tassent. Le tassement est très important lorsque le sol est mis en contact de l'eau. La variation de volume des sols expansifs, étudiés par ANDRE, ATHANASIU, et MANEA, (1980), est fonction de leur teneur en eau, et de la charge verticale qu'ils supportent. La pression de gonflement d'un sol expansif est définie comme la pression nécessaire pour empêcher le gonflement du sol, ou la pression nécessaire pour remettre un échantillon de sol à son volume initial après gonflement. ANDRE, ATHANASIU, et MANEA, (1980) indiquent que:

- si la charge appliquée est plus importante que la pression de gonflement, le sol se comprime lorsqu'il est mis en contact de l'eau,
- si la charge appliquée est plus faible que la pression de

gonflement, le sol gonfle lorsqu'il est mis en contact de l'eau. Dans le cas du gonflement, l'amplitude de ce dernier est fonction de la quantité d'eau ajoutée au sol (soit à la teneur en eau), et de la charge appliquée. Pour différentes charges appliquées à l'échantillon de sol, les maxima des courbes de gonflement en fonction de la teneur en eau se situent sur une même droite de saturation (voir figure 3.2).

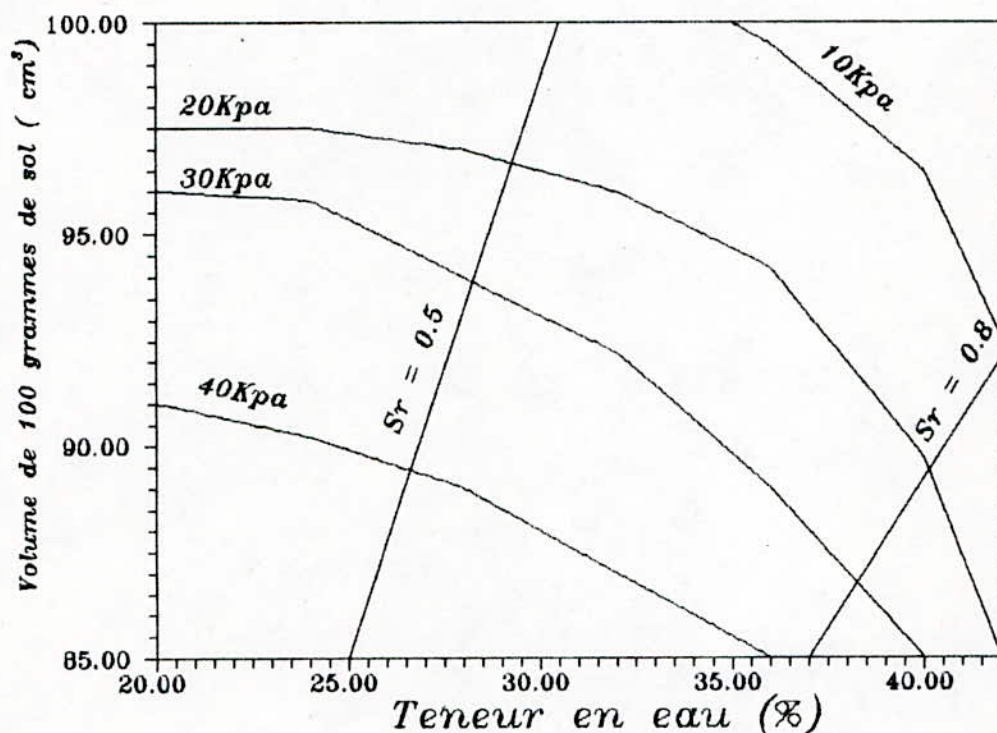


Figure 3.2: Courbes d'Égales Pressions de Surcharge.
(KASSIFF et al., 1965).

RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965) déduisent une relation linéaire entre le potentiel de gonflement et l'indice de retrait. Les sols étudiés par RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965) sont des argiles noires du sud de l'Inde. Le potentiel de gonflement et l'indice de retrait sont représentés en échelle logarithmique, tel que montré sur la figure 3.3.

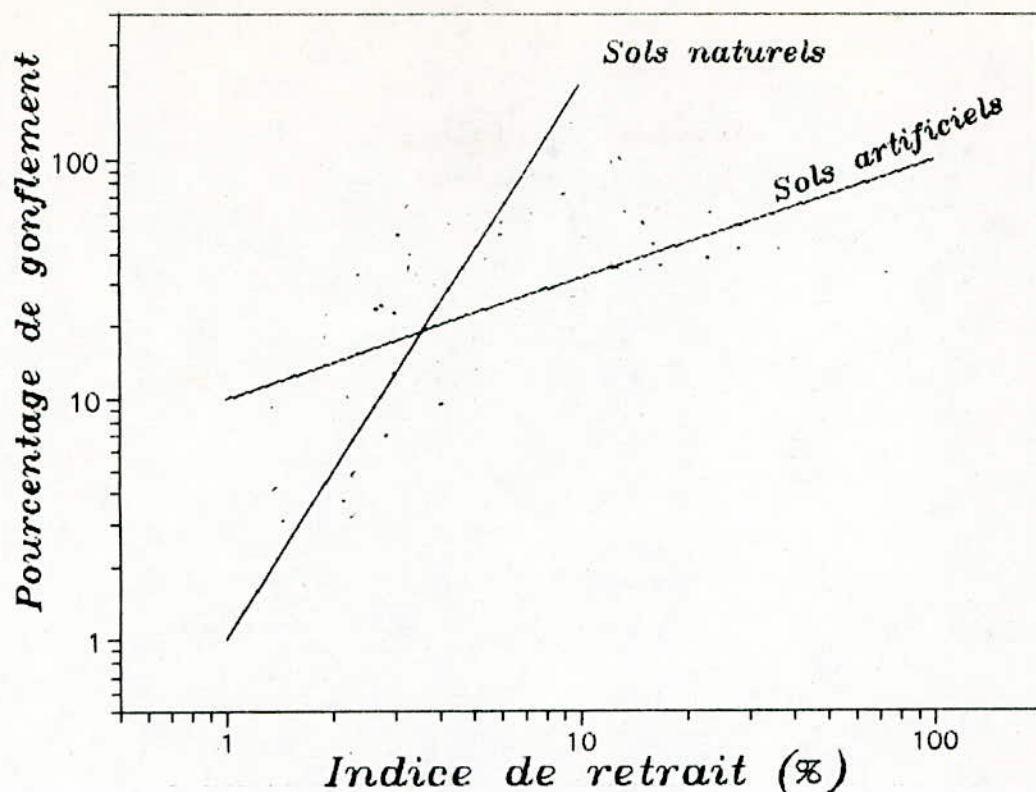


Figure 3.3: Variation du pourcentage de gonflement avec l'indice de retrait (d'après RANGANATHAM et SATYANARAYANA).

La figure 3.3 montre que la droite représentant les sols naturels étudiés, et la droite représentant les sols artificiels concourent au point d'indice de retrait égal à 22% environ. Cette constatation peut indiquer qu'à cette valeur de l'indice de retrait, l'état d'arrangement des grains (état de compacité) du sol artificiel est proche de celui du sol intact.

JOHNSON et SNETHEN (1978) affirment que pour un sol non fissuré, le gonflement ne se propage que dans la direction verticale. L'affirmation de JOHNSON et SNETHEN sous-entend un sol homogène et très étendu relativement à l'endroit considéré. RICHARDS (1967) et LYTTON (1971) admettent que, dans la plus part des cas, le gonflement se manifeste dans la direction verticale, et que les fissures peuvent réduire les pressions latérales et limiter, par conséquent, le gonflement dans la direction verticale au tiers du gonflement volumique. Pour les essais de gonflement à l'oedomètre, le gonflement vertical est égal au gonflement volumique.

3.2.5 Temps de Gonflement.

Le gonflement des sols est un phénomène dépendant du temps. Le gonflement des sols argileux est considéré comme un fluage au cours duquel les pourcentages de gonflement peuvent varier même si les conditions de "charges" sont constantes. CHEN (1988) affirme que le temps nécessaire pour que le sol atteigne la valeur maximale de son gonflement peut varier considérablement compte tenu, essentiellement, de la densité initiale du sol, et de son épaisseur. Pour les sols remaniés, 24 heures sont suffisantes pour atteindre 95 % du gonflement total, tandis que pour les argiles schisteuses denses, cela peut demander quelques jours. Pour les essais de laboratoire, le temps d'incrémentation des charges est un facteur très important affectant les résultats de l'essai. Le temps d'incrémentation des charges devrait être assez faible de sorte à permettre, au moins, une dissipation complète de la tension interstitielle, quelle soit positive (cas d'un chargement) ou négative (cas d'une décharge). Plus la charge d'incrément d'un palier est importante, plus le temps nécessaire pour la stabilisation du phénomène de fluage est grand, par conséquent, il existe une infinité de couples charge de palier temps d'incrément de la charge. 24 heures est la durée de temps d'incrément des charges standardisée par les normes internationales pour les essais de consolidation. Elle a été retenue pour les essais de gonflement.

JOHNSON et SNETHEN (1979) ont implanté des repères fixes dans les sites Clinton, Lackland et Fort Carson (U.S.A) pour suivre et contrôler les variations topographiques des niveaux du terrain dans le temps. Les courbes représentant les variations de niveau sont tracées point par point depuis l'instant initial jusqu'aux environs de 2793 jours, puis extrapolées à 8000 jours, la méthode d'extrapolation n'étant pas spécifiée. La prédiction du potentiel de gonflement par extrapolation de courbes est souvent entachée d'erreurs. L'intervalle considéré par JOHNSON et SNETHEN (1978)

[2793 jours à 8000 jours] correspond à peu près à quatorze ans et trois mois, ce qui sous-entend une séquence de périodes humides et de périodes relativement sèches. Le sol peut se rétrécir à la suite d'une longue période sèche, et peut, paradoxalement, gonfler à la suite d'une longue période humide. Les variations de volume du sol sont accompagnées de variation de teneur en eau et de densité du sol. En faisant des essais de gonflement au laboratoire, CHEN (1988) a remarqué que le potentiel de gonflement diminue au cours du temps du fait de la répétition des cycles d'humidité-sècheresse, on parle alors de la fatigue du gonflement. En faisant des observations, au Texas, sur de vieilles constructions reposant sur sol gonflant, CHU (1973) a remarqué que celles-ci tendent à se stabiliser dans le temps. Après plusieurs cycles pluviométriques, le gonflement devient faible, cependant, le retrait du sol ne semble pas être affecté par le nombre de répétitions (CHU, 1973).

3.2.6 Discussion sur les Méthodes de Prédiction du Gonflement.

Vers 1920, K.TERZAGHI a émis le principe de la contrainte effective. Le principe en question affirme, en terme général, que le comportement d'un élément dans une masse de sol dépend non pas de la contrainte totale appliquée dessus, mais, plutôt, de la différence de celle-ci et de la pression interstitielle du fluide des pores (CHEN, 1988). De manière générale, le principe de la contrainte effective a été appliqué à tous les sols bien que TERZAGHI l'ait développé pour les sables saturés. Pour le cas des sols non saturés, la rigueur exige qu'il soit pris en considération le fait que la pression interstitielle agit sur les interfaces solide-liquide seulement, en outre, les forces d'attraction et/ou de répulsion d'origine électro-chimique peuvent se développer aux endroits non atteints par l'eau. Le principe de la contrainte effective doit, par conséquent, être adapté au sols gonflants de sorte à ajouter l'effet des forces attractives et retrancher celui des forces répulsives (CHEN, 1988). Toutefois, AITCHISON et RICHARDS (1969) considèrent qu'il est essentiel d'utiliser le

principe de la contrainte effective pour la quantification du comportement des sols expansifs.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour la prévision du gonflement d'un sol expansif. Chaque méthode proposée a été développée sur une classe de sol. Les caractéristiques, physiques et mécaniques du sol sont différentes d'une classe à une autre. Les données nécessaires, pour ces méthodes, sont généralement des grandeurs physiques telles que les limites de consistance du sol, sa teneur en eau initiale, sa densité sèche, et sa teneur en argile.

Les paramètres physiques, et mécaniques nécessaires pour l'ensemble des modèles considérés sont résumés sur le tableau 3.1. Les modèles de prédiction du gonflement, présentés sur le tableau 3.1 se basent, essentiellement, sur les limites d'ATTERBERG, et sur la teneur initiale en eau du sol. Pour l'ensemble des auteurs, la teneur initiale en eau indique la teneur en eau au moment de l'échantillonnage, ou le moment du début de l'essai de gonflement. Ces deux teneurs en eau peuvent être différentes si des précautions de transport, et de stockage, des échantillons de sol ne sont pas prises.

Le tableau 3.1 montre que les paramètres physiques, et mécaniques, nécessaires pour l'ensemble des modèles considérés, sont généralement des caractéristiques d'identification du sol. Les caractéristiques, nécessaires pour la prédiction du gonflement d'un sol expansif, doivent être plus facilement déterminables que le potentiel de gonflement du sol. L'un des buts d'une prédiction, est d'arriver à quantifier une grandeur sans la mesurer directement.

La méthode du double oedomètre, développée par JENNING et KNIGHT (1958), est basée sur l'hypothèse que, la courbe de consolidation vierge d'un sol gonflant non saturé rejoint, dans son allure, la courbe de consolidation vierge du même sol lorsqu'il est inondé

Tableau 3.1: Contribution des Paramètres Physiques et Mécaniques dans Différents Modèles de Prédiction du Potentiel et de la Pression de Gonflement des Sols Expansifs.

Auteurs des modèles	Grandeur prédite	Paramètres Physiques et Mécaniques														Expressions Mathématiques des Modèles de Prédiction	
		ω_0	ω_l	I_p	I_r	C	γ_d	e_0	A	C_s	H	h	P_p	P_0	P_m		
SCHNEIDER et POOR (1974)	Pourcentage de gonflement	X		X													$S = 10^{(0.9 \frac{I_p}{\omega_0} - 1.19)}$
VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973)	Pourcentage de gonflement	X	X														$S = 10^{\frac{1}{12}(0.4\omega_l - \omega_0 + 5.5)}$
			X				X										$S = 10^{\frac{1}{10.5}(62.42\gamma_d + 0.65\omega_l - 130.5)}$
SEED et al. (1) (1962)	Pourcentage de gonflement					X			X								$S = 3.6 \cdot 10^{-5} \cdot A^{2.44} \cdot C^{3.44}$
SEED et al. (2) (1962)	Pourcentage de gonflement			X													$S = 216 \cdot 10^{-5} \cdot I_p^{2.44}$
RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965)	Pourcentage de gonflement				X	X											$S = 4.57 \cdot 10^{-5} \left(\frac{I_r}{C-n}\right)^{2.67} C^{3.44}$
JOHNSON (1978)	Pourcentage de gonflement	X		X							X						Si $I_p \geq 40\%$: $S = 23.82 + 0.7346I_p - 0.1458H - 1.7\omega_0 + 25.10^{-4} \omega_0 \cdot I_p - 884 \cdot 10^{-5} H \cdot I_p$.
																	Si $I_p < 40\%$: $S = -0.18 + 1.5546I_p + 8424 \cdot 10^{-5} H + 0.1\omega_0 - 432 \cdot 10^{-4} \omega_0 \cdot I_p - 1215 \cdot 10^{-5} H \cdot I_p$.
FREDLUND, D (1983)	Pourcentage de gonflement							X	X				X	X			$S = \frac{C_s}{1+e_0} \log_{10} \left(\frac{P_p}{P_0} \right)$
ABDELMUHSIN, W. DHOWIAN (1990)	Pourcentage de gonflement							X	X					X	X		$S = \frac{C_s}{1+e_0} \log_{10} \left(\frac{P_m}{P_0} \right)$
VAN DER MERWE (1954)	Pourcentage de gonflement			X		X						X					$S = h_i F_i (P_e)_i$ Où $F_i = 10^{-h_i/20}$
NAYAK et CHRISTENSEN (1971)	Pourcentage de gonflement	X	X	X	X	X											$S = 2.29 \cdot 10^{-2} E^{1.45} (C/\omega_0) + 6.38$ Où E désigne: I_p, I_r, ω_l.
	Pression de gonflement	X	X	X	X	X											$P = 0.07 (3.5817 \cdot 10^{-2} E^{1.42} (C/\omega_0)^2 + 3.7912)$
KOMORNIK et DAVID (1969)	Pression de gonflement	X	X				X										$P = 10^{-1.87 + 208 \cdot 10^{-4} \omega_l + 665 \cdot 10^{-6} \gamma_d - 269 \cdot 10^{-4} \omega_0}$

ω_0 : Teneur initiale en eau de l'échantillon de sol.

ω_l : Limite de liquidité du sol.

I_p : Indice de plasticité du sol.

I_r : Indice de retrait du sol.

C : Teneur en argile du sol ($\% < 2\mu$).

γ_d : Poids volumique sec du sol.

e_0 : Indice des vides de l'échantillon de sol.

A : Activité du sol (selon SKIMPTON).

C_s : Coefficient de gonflement du sol.

H : Profondeur d'échantillonnage.

h : Epaisseur de la couche gonflante.

P : Pression de gonflement prédite.

P_p : Contrainte effective de préconsolidation.

P_0 : Pression effective verticale sur site.

P_m : Pression de gonflement mesurée.

S : Pourcentage de gonflement prédit.

d'eau. Le département de NAVY (1982) a mis au point une procédure pour l'estimation de l'amplitude du gonflement ayant lieu lorsque des fondations sont ancrées dans un sol gonflant. La procédure suppose que le sol de fondation, situé à une profondeur appréciable, ne gonfle pas autant que le sol de surface à cause de l'effet de la pression des terres sus-jacentes. La procédure du département de NAVY (1982) est applicable Pour le cas des constructions lourdes. NAYAK et CHRISTENSEN (1971) proposent, pour la prédiction du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement, une approche semi-empirique présentée en formulation assez simplifiée et pratique pour les ingénieurs. L'approche purement théorique et celle purement expérimentale possède chacune certains défauts et certaines limites d'utilisation:

- l'approche purement théorique suppose, presque toujours, des hypothèses simplificatrices et des idéalizations parfois exagérées ce qui conduit, le plus souvent, à des résultats différents des valeurs constatées. Ces résultats pourraient se rapprocher des valeurs réelles lorsqu'ils sont multipliés par des coefficients correcteurs. Le déroulement de certains phénomènes est tellement complexe qu'il est parfois impossible de les modéliser.
- l'approche purement empirique, bien que présente l'avantage d'être plus pratique et maniable, elle semble souvent ne pas pouvoir être théoriquement explicable. La forme des équations gouvernantes ne reflète pas le cheminement du raisonnement aboutissant à la forme finale du modèle. D'autre part, l'étude est souvent basée sur l'expérimentation sur un nombre restreint d'échantillons de sols et risque, par conséquent, d'être non applicable à d'autres sols.

NAYAK et CHRISTENSEN proposent une vue semi-empirique qui est un compromis entre l'approche théorique et l'approche empirique. Leur approche est basée sur la théorie de la double couche diffuse et sur le concept de la pression osmotique entre les feuillets

d'argiles. Pour palier aux non conformités des prévisions théoriques aux mesures expérimentales, d'une part, et du système de sol réel et le modèle théorique d'autre part, des constantes empiriques sont introduites. Ces "constantes" empiriques dépendent des caractéristiques physiques des sols étudiés, elles diffèrent d'un type de sol à un autre. NAYAK et CHRISTENSEN indiquent que le gonflement d'un sol expansif est affecté par plusieurs paramètres, dont les plus dominant sont:

- l'indice de plasticité, la limite de liquidité, ou l'indice de retrait,
- la teneur naturelle en eau, et
- la teneur en argile (% en poids, des éléments inférieurs à deux microns).

Les deux auteurs affirment, après comparaison des corrélations entre les prévisions théoriques et les valeurs observées du potentiel de gonflement, que parmi l'indice de plasticité, la limite de liquidité, et l'indice de retrait, le paramètre représentant le mieux les conditions initiales de l'échantillon de sol est l'indice de plasticité.

Pour les sols d'Arabie Saoudite, ABDULMOHSIN.W.DHOWIAN (1990) constate qu'en prenant la teneur initiale en eau égale à la limite de retrait, et la teneur en eau après gonflement égale à la limite de plasticité, les résultats prévus du potentiel de gonflement, et les résultats observés sont comparables. RANGANATHAM et SATYANARAYANA affirment, qu'en général, la teneur finale en eau des sols expansifs est de l'ordre de la limite de liquidité.

KOMORNIK et DAVID constatent, sur 125 sols de la Palestine que:

- la limite de retrait n'est pas corrélée à l'indice de plasticité,
- le gonflement libre, est faiblement corrélé à l'indice de plasticité,

et que la pression de gonflement est reliée à:

- la densité sèche,

- la teneur naturelle en eau et,
- la limite de liquidité.

Les auteurs tiennent compte des trois derniers paramètres (γ_d , ω_l , et ω_0) pour prévoir la pression de gonflement. La forme de l'équation du modèle de KOMORNIK et DAVID (1969) montre que la pression de gonflement est proportionnelle à la densité sèche et à la limite de liquidité, et est inversement proportionnelle à la teneur naturelle en eau. Les paramètres des expressions donnant la pression de gonflement en fonction de la densité sèche, de la limite de liquidité, et de la teneur naturelle en eau, sont obtenus par analyse régressive des grandeurs précédentes. Les travaux d'ABDULMOHSIN W.DHOWIAN (1990), montrent que le potentiel de gonflement, et la pression de gonflement ne sont pas corrélés à la limite de liquidité. La détermination, par la méthode des moindres carrés, des certaines constantes apparaissant dans les modèles peuvent attribuer des valeurs négatives au potentiel de gonflement, ou à la pression de gonflement. Le phénomène doit, par conséquent, être analysé d'un point de vue physique.

JOHNSON et SNETHEN (1979) ont utilisé des mesures de succion pour la prévision du soulèvement. Les essais de succion présentent l'avantage de réduire le remaniement, et ne nécessitent pas le taillage d'un échantillon de sol selon une forme donnée. Certains paramètres nécessaires pour le modèle d'ABDELMOHSIN W.DHOWIAN sont déterminées par construction graphique. Les paramètres déterminés sont:

- le facteur de compressibilité volumétrique : pente de la courbe représentant la variation du volume spécifique en fonction de la teneur en eau (le volume spécifique est défini comme l'inverse du poids volumique sec), et
- la pente de la courbe de variation de la succion en fonction de la teneur en eau.

Les résultats de prédiction du potentiel de gonflement, par le modèle d'ABDELMOHSIN.W.DHOWIAN tenant compte de la succion, sont

comparables aux mesures expérimentales. Pour la prédiction du potentiel de gonflement sur site, l'auteur (ABDULMOHSIN. W. DHOWIAN) propose la prise en compte du tiers du coefficient de compressibilité volumétrique déterminé au laboratoire car:

- la mesure de la succion au laboratoire se fait sur un échantillon de sol gonflant de manière volumique,
- le gonflement sur site est vertical dans l'hypothèse de l'homogénéité du sol, et de l'uniformité des conditions environnantes,
- en supposant le matériau isotrope, le gonflement unidimensionnel (vertical en particulier) est égal au tiers du gonflement volumétrique.

Dans le modèle de JOHNSON et SNETHEN (1979), basé sur des essais oedométriques, les résultats de prévision du potentiel de gonflement sont plus grands relativement aux mesures sur site. Cependant, les tiers des résultats de prévision sont faibles par rapport aux mesures expérimentales. Les mesures du potentiel de gonflement à l'oedomètre sont souvent plus faibles que les mesures, sur site. La différence peut être due à la non simulation des conditions naturelles et des conditions aux limites par la cellule oedométrique (frottements latéraux, taille réduite de l'échantillon de sol, ...). Cependant, le gonflement libre, mesuré au laboratoire, peut être plus grand que le gonflement sur site. En effet, l'essai de gonflement libre ne simule le gonflement qu'à la surface du terrain. Le sol se trouvant en profondeur est soumis à un gonflement gêné par le poids des terres sus-jacentes.

NAYAK et CHRISTENSEN (1971) suggèrent une relation étroite entre la pression de gonflement et la pression osmotique. Cette dernière est régie par l'équation de VAN'THOFF. L'approche de NAYAK et CHRISTENSEN sous-entend une prise en compte des phénomènes d'interaction électrique entre les particules d'argile. La considération de la pression osmotique fait intervenir la constante des gaz parfaits, la concentration ionique du fluide des pores, et

la valence des cations échangeables. Certains des paramètres affectant le comportement des sols gonflants tel que la température, sont indirectement considérés.

L'apparition de la teneur initiale en eau au dénominateur des expressions des modèles de certains auteurs (NAYAK et CHRISTENSEN, 1971; SCHNEIDER et POOR, 1974) rend ces modèles incompatibles avec les sols initialement "secs". Lorsque la teneur initiale en eau est faible, ce qui est possible à la surface du terrain, les grandeurs prédites par ces modèles prennent des valeurs infiniment grandes.

CHEN (1988) a remarqué que les méthodes de prévision du potentiel de gonflement proposées par divers auteurs sont inspirées du concept du tassement ultime de la théorie de consolidation. Avec le temps, les ingénieurs de sol se sont familiarisé avec les méthodes de calcul des tassements ultime et différentiel de structures fondées sur sols argileux. Le gonflement a été supposé pouvoir être estimé de la même manière. Cependant, des différences existent entre le comportement des sols expansifs et le comportement des sols compressibles.

JOHNSON et SNETHEN (1979) proposent, pour la prédiction du potentiel de gonflement à partir de l'essai à l'oedomètre, une expression mathématique dans laquelle apparaît le logarithme du rapport de la pression de gonflement sur la pression de chargement de l'échantillon de sol. Lorsque la pression de gonflement est égale à la pression de chargement, le gonflement doit être nul. Cependant sur site, un gonflement peut être observé car la pression de gonflement n'est pas étroitement liée à la profondeur d'échantillonnage.

Les résultats obtenus par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN (1971), aussi bien pour le potentiel de gonflement que pour la pression de gonflement sur des sols reconstitués par ces auteurs, semble être meilleurs comparés aux résultats des modèles proposés par SEED et

al.(1962), RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965), et KOMORNIK et DAVID (1969).

CHAPITRE 4
PREDICTION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT
DES SOLS D'IN-AMENAS

4.1 INTRODUCTION.

L'objet de ce chapitre est de prédire, compte tenu des modèles étudiés, le potentiel de gonflement des sols expansifs d'IN-AMENAS, et d'essayer d'interpréter les résultats de prédiction. Les courbes reliant les résultats prévus aux valeurs mesurées au laboratoire, sont discutées compte tenu de la méthode de prédiction et des conditions d'état des échantillons de sol étudiés.

Les méthodes de prédiction sont soit empiriques (SEED et al. (1962), VAN. DER. MERWE (1964), RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965), VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973), SCHNEIDER et POOR (1974), et JOHNSON (1978)), soit théoriques (FREDLUND. D (1983), et ABDULMOHSIN W. DHOWIAN (1990)), soit combinées (NAYAK et CHRISTENSEN (1971)). Les modèles empiriques sont, probablement, d'autant plus applicables que les sols étudiés ressemblent à ceux ayant servi à l'élaboration de ces modèles. La ressemblance regroupe les paramètres minéralogiques, tels que la nature des particules constituant le sol, les paramètres physiques (indice des vides, teneur en eau, densité sèche, limites de consistance, arrangement structural), et les paramètres mécaniques (coefficient de gonflement, coefficient de succion, coefficient d'expansion).

Les résultats de prédiction par deux méthodes différentes, telles que celles de seed et al. (méthodes 1, et 2), peuvent être très proches, ce qui peut signifier que certains paramètres sont pris en compte de manière indirecte. Dans le modèle de KOMORNIK et DAVID, la densité sèche, la teneur initiale en eau, et la limite de liquidité du sol sont pris en compte. L'ensemble de ces paramètres reflète la valeur de l'indice des vides initial, et du degré de saturation car ceux-ci dépendent, étroitement, des paramètres considérés.

Les sols, ayant servi pour l'établissement des modèles de prédiction, sont définis, chacun, par ses caractéristiques physiques. Ces modèles de prédiction du gonflement sont à utiliser, de préférence, pour les classes de sols pour lesquelles ces modèles ont été développés. Les résultats des modèles de prédiction, ainsi que les mesures expérimentales du gonflement sont fonction des caractéristiques physiques et mécaniques du sol expansif considéré. Par conséquent, la connaissance des caractéristiques des échantillons de sol étudiés est nécessaire.

A cet effet, les caractéristiques géotechniques, ainsi que les résultats expérimentaux de mesures du gonflement de douze échantillons de sol de la région d'IN-AMENAS sont donnés sur le tableau 4.1. Le nombre d'observation, et d'essais expérimentaux sur les sols d'IN-AMENAS, étant relativement faible, quatre échantillons de sols, rapportés dans l'étude de KOMORNIK et DAVID sur les sols de la Palestine, ont été ajoutés au tableau 4.1. Le choix de ces quatre échantillons de sol est basé sur le critère de ressemblance des caractéristiques physiques entre les sols étudiés par KOMORNIK et DAVID et les sols d'IN-AMENAS, ainsi que sur l'ordre de grandeur du potentiel de gonflement observé. Les échantillons de sol ont été numérotés selon le sens croissant de leurs pourcentages de gonflement mesurés.

Le tableau 4.1 montre que les caractéristiques des échantillons de sols sont assez différents les uns des autres. Les plus grandes différences sont notées entre les teneurs initiales en eau, les teneurs en éléments inférieurs à 2 microns, les profondeurs d'échantillonnage, et les indices de plasticité. Les limites de liquidité des sols étudiés sont grandes. Les teneurs initiales en eau, des sols d'IN-AMENAS, sont faibles, dans leur ensemble, ce qui indique la grande affinité à l'eau de ces sols. Le tableau 4.1 montre aussi que les pressions de gonflement mesurées, et les pourcentages de gonflement mesurés sont très variables d'un sol à un autre. Les douze échantillons de sol prélevés dans la région d'IN-AMENAS présentent des différences remarquables dans leurs

caractéristiques physiques et mécaniques.

Les paramètres physiques et mécaniques intervenant dans chaque modèle de prédiction, ainsi que les expressions mathématiques des modèles utilisés, sont donnés sur le tableau 3.1. Le pourcentage de gonflement du sol, et sa pression de gonflement ont été déterminés selon la procédure A.S.T.M D45-46-86, méthode A. Cette méthode mesure le pourcentage de gonflement d'un échantillon de sol placé dans une cellule oedométrique, et soumis à une faible charge verticale (0.07 bars, l'équivalent du poids du piston). la procédure A.S.T.M D45-46-86, méthode A définie:

- le pourcentage de gonflement comme la variation de l'indice des vides entre l'état initial du sol, et l'état de gonflement ultime, rapportée à l'indice de vides initial du sol,
- la pression de gonflement comme la contrainte nécessaire pour ramener l'échantillon de sol à son volume initial après qu'il ait gonflé.

Les données expérimentales retenues dans cette étude sont, principalement, recensées du rapport de sol du projet de la raffinerie de pétrol d-IN-AMENAS.

4.2 INTERPRETATION des RESULTATS de PREDICTION.

Les résultats des prédictions du pourcentage de gonflement des Seize échantillons de sol, compte tenu des méthodes considérées, sont résumés sur le tableau 4.2. Le tableau 4.2 montre que les résultats de divers modèles de prédiction, du pourcentage de gonflement, et de la pression de gonflement, sont le plus souvent différents des mesures expérimentales. Les résultats d'un même modèle de prédiction peuvent être:

- très proches les uns des autres (cas des résultats du modèle de VAN DER MERWE, et de FREDLUND.D). Ces modèles sont peu sensibles aux variations des valeurs des caractéristiques physiques et mécaniques des sols d'IN-AMENAS.

Tableau 4.1: Caractéristiques Géophysiques des Echantillons de Sols.

	ω_0 (%)	ω_l (%)	ω_p (%)	I_p (%)	ω_r (%)	I_r (%)	C (%)	γ_d (g/cm ³)	e_0	A	C_s	H (cm)	H_e (cm)	S_m (%)	P_p (Bars)	P_0 (Bars)	P_m (Bars)
Ech 1	14.10	56.50	20.73	35.77	12.00	44.50	46.45	1.764	0.484	0.77	0.086	03.22	07.45	01.75	06.67	0.568	00.71
Ech 2	10.75	84.00	27.20	56.80	12.00	72.00	29.89	1.726	0.530	1.90	0.118	01.25	07.81	03.92	02.60	0.216	02.40
Ech 3	08.84	73.90	15.90	58.00	06.72	67.18	64.44	1.600	0.582	0.90	0.103	03.13	08.61	07.32	03.96	0.501	04.40
Ech 4	07.98	69.00	17.00	52.00	06.72	62.28	65.00	2.014	0.311	0.80	0.121	03.87	06.90	10.67	07.75	0.780	18.20
Ech 5	14.70	70.00	22.30	47.70	12.00	58.00	65.34	1.601	0.638	0.73	0.109	08.18	08.17	12.04	16.37	1.310	06.00
Ech 6	02.60	43.00	20.00	23.00	12.50	30.50	52.00	2.090	0.295	0.44	0.090	—	06.98	13.43	05.00	—	23.00
Ech 7	09.51	58.00	22.80	35.20	12.00	46.00	46.32	1.800	0.435	0.76	0.075	01.72	07.61	14.00	04.81	0.310	05.00
Ech 8	07.23	73.90	21.90	52.00	11.34	62.56	65.00	1.706	0.536	0.80	0.095	02.30	08.20	18.42	04.50	0.392	06.20
Ech 9	04.13	64.00	26.26	40.00	11.00	53.00	37.74	2.000	0.365	1.06	0.025	02.00	07.20	18.90	04.10	0.400	09.50
Ech 10	03.20	61.00	22.00	39.00	13.80	47.20	68.00	2.040	0.320	0.57	0.130	—	06.94	29.00	04.80	—	26.80
Ech 11	24.80	46.00	21.00	25.00	14.00	32.00	—	1.830	0.480	—	—	08.15	—	30.00	—	1.491	00.30
Ech 12	08.60	35.00	16.00	19.00	14.10	20.90	49.00	2.145	0.280	0.39	—	13.50	—	30.00	—	2.900	00.80
Ech 13	04.80	28.00	13.00	15.00	—	—	90.00	1.705	0.610	0.47	—	08.50	—	30.00	—	1.449	00.40
Ech 14	03.05	75.00	25.00	50.00	10.00	65.00	74.00	2.080	0.298	0.68	0.115	—	07.14	33.20	04.90	—	68.00
Ech 15	03.85	71.00	26.00	46.00	13.40	57.60	70.00	2.080	0.297	0.66	0.110	—	07.01	33.85	04.50	—	66.50
Ech 16	33.30	58.00	24.00	34.00	23.40	34.60	37.00	1.325	1.040	0.92	—	20.00	—	40.00	—	2.080	00.20

ω_0 : Teneur initiale en eau de l'échantillon de sol.

ω_l : Limite de liquidité du sol.

I_p : Indice de plasticité du sol.

I_r : Indice de retrait du sol.

C : Teneur en argile du sol (% < 2 μ).

γ_d : Poids volumique sec du sol.

e_0 : Indice des vides de l'échantillon de sol.

A : Activité du sol (selon SKIMPTON).

C_s : Coefficient de gonflement du sol.

H : Profondeur d'échantillonnage.

H_e : Profondeur équivalente d'échantillonnage.

P_p : Contrainte effective de préconsolidation.

P_0 : Pression effective verticale sur site.

P_m : Pression de gonflement mesurée.

Tableau 4.2: Résultats des Modèles de Prédiction du Pientiel de Gonflement par Divers Auteurs.

Echantillon Auteurs	Pourcentages de Gonflement (%)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SCHNEIDER et POOR	12.39	3676	51877	47278	53.75	591 10 ⁴	138.4	191879	336 10 ⁵	6 10 ⁶	00.52	06.29	41.93	36652 10 ⁶	3658 10 ⁶	00.54
VIJAYVERGIYA et OHAZZALY (1)	14.68	230.4	153.1	124.0	36.87	47.32	39.73	208.53	176.81	167.88	00.84	08.10	09.81	506.02	319.28	00.41
VIJAYVERGIYA et OHAZZALY (2)	06.88	42.92	7.81	113.4	05.83	27.00	10.07	17.06	69.67	74.32	05.00	21.91	00.50	292.30	215.03	00.30
SEED et al. (1)	10.32	20.52	46.57	36.00	29.31	03.88	09.90	36.00	11.02	18.39	—	—	—	37.28	28.73	07.29
SEED et al. (2)	13.34	41.22	43.37	33.23	26.92	04.52	12.82	33.23	17.52	16.47	05.56	02.85	01.60	30.20	24.64	11.78
RANGANATHAM et SATYANARAYANA	42.24	168.8	134.0	109.8	90.90	15.56	46.15	110.80	68.37	53.07	—	05.63	—	128.25	91.14	21.98
JOHNEON	26.04	48.78	52.67	49.49	35.61	24.25	32.03	50.66	46.27	46.73	05.38	14.16	11.51	08.09	52.77	38.40
FREDLUND, D	11.47	12.11	11.41	18.87	15.76	12.88	09.60	11.18	03.24	18.08	—	—	—	16.35	15.33	—
ABDELMUHSIN, W. DHOWIAN	05.79	11.84	11.71	206.3	12.86	17.00	09.69	12.04	03.91	25.31	—	—	—	26.47	25.25	—
VAN DER MERWE	08.10	08.09	08.07	08.12	08.12	04.06	08.10	08.08	08.11	08.11	—	—	—	08.11	08.11	—
NAYAK et CHRISTENSEN (wl)	32.57	45.66	90.40	92.89	54.59	113.38	46.60	111.85	93.41	195.15	—	29.00	25.53	297.19	207.66	15.55
NAYAK et CHRISTENSEN (Ir)	24.90	37.79	80.57	80.95	43.08	71.41	35.12	89.22	72.58	136.52	—	17.09	—	242.70	155.00	10.72
NAYAK et CHRISTENSEN (Ip)	19.86	28.65	66.57	63.79	34.02	49.57	25.87	69.74	50.40	105.06	—	15.71	14.13	167.92	110.28	10.61
VALEURS MESUREES	01.75	03.92	07.32	10.67	12.04	13.43	14.00	18.42	18.90	29.00	30.00	30.00	30.00	33.20	33.85	40.00
Pressions de Gonflement (Bars)																
NAYAK et CHRISTENSEN (wl)	02.77	03.50	16.84	10.43	06.07	68.29	05.91	35.47	22.43	113.87	—	04.65	04.94	186.92	98.85	00.56
NAYAK et CHRISTENSEN (Ir)	02.18	02.61	15.16	17.35	04.96	46.57	04.62	21.81	18.21	85.51	—	02.73	—	159.28	78.26	00.43
NAYAK et CHRISTENSEN (Ip)	01.76	02.06	12.90	14.23	04.04	34.02	03.49	17.27	13.36	69.10	—	02.48	02.59	118.79	60.95	00.43
KOMORNIK et DAVID	01.26	05.06	03.13	04.92	01.81	01.20	01.63	03.02	03.14	02.43	00.43	00.80	00.52	06.40	04.28	00.21
VALEURS MESUREES	00.71	02.40	04.40	18.20	06.00	23.00	05.00	06.20	09.50	26.80	00.30	00.80	00.40	68.00	66.50	00.20

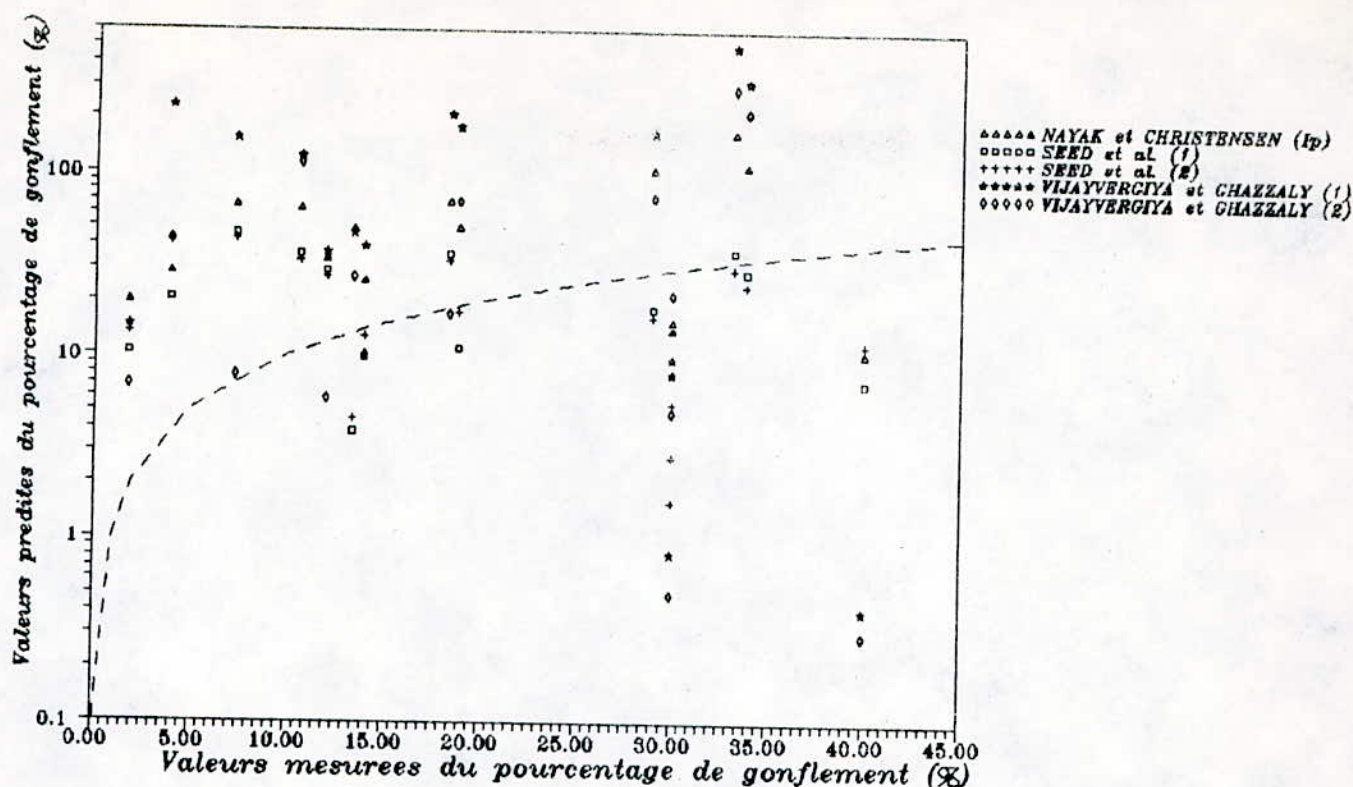


Figure 4.1: Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédiction des Pourcentages de Gonflement Selon les Auteurs Cités Dans la Légende.

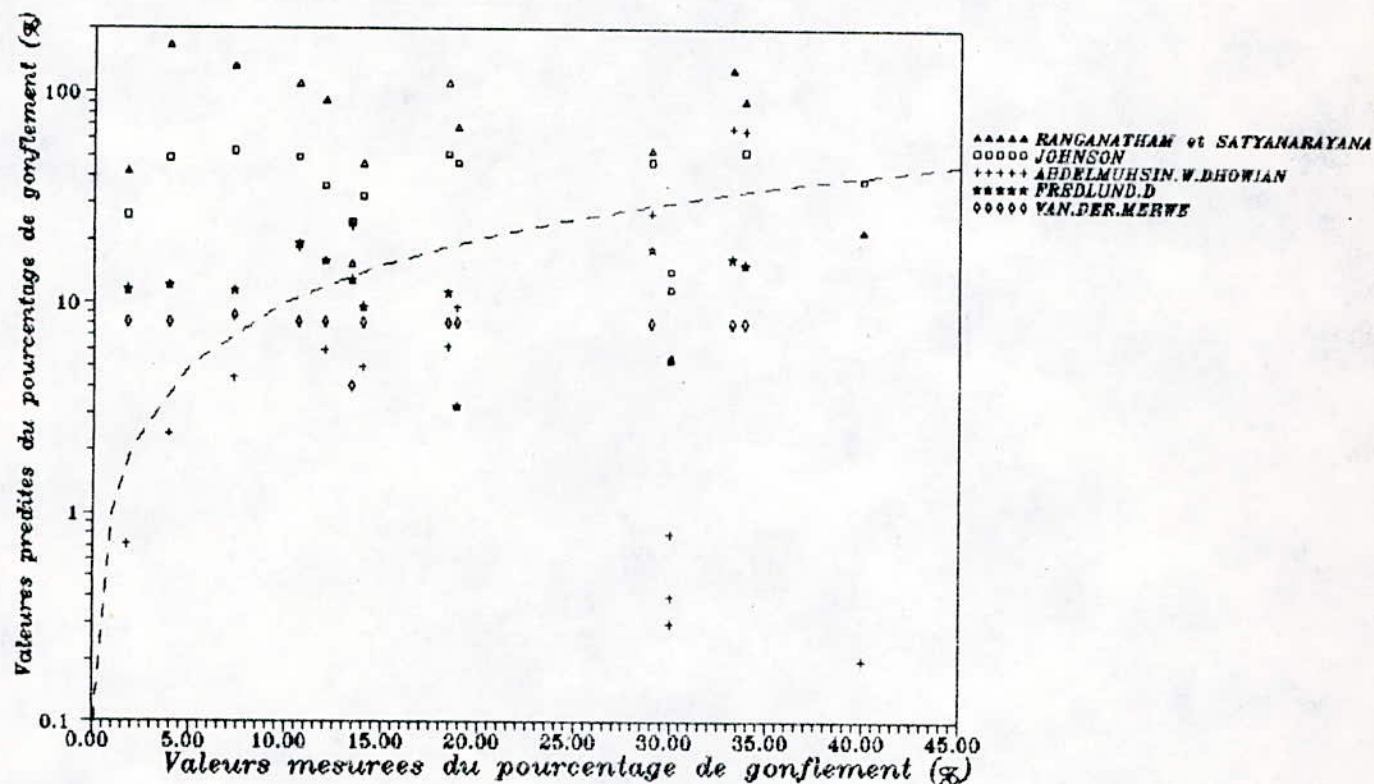


Figure 4.2: Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédiction des Pourcentages de Gonflement Selon les Auteurs Cités Dans la Légende.

- différents les uns par rapport aux autres, et différents dans leur ensemble aux mesures expérimentales (modèle de NAYAK et CHRISTENSEN, et de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY). Certaines méthodes, telles que celles de SEED et al. (1 et 2), donnent des résultats respectivement comparables. Les figures 4.1 et 4.2 montrent des comparaisons entre les mesures expérimentales, et les résultats théoriques de prédiction du pourcentage de gonflement.

L'examen des résultats des prédictions du pourcentage de gonflement et de la pression de gonflement montre une dispersion assez importante non seulement entre méthodes l'une comparativement à l'autre, mais aussi, pour une méthode donnée, les résultats de prédiction peuvent être aussi bien proches que loin des mesures expérimentales. La dispersion des résultats dépend de la nature des échantillons de sol étudiés, entre autres, leurs caractéristiques minéralogiques, mécaniques, et physico-chimiques. La dispersion des résultats est aussi fonction de la méthode de prédiction utilisée. Pour un même modèle, la conformité des résultats de prédiction aux mesures expérimentales ne semble pas être évidente.

4.2.1 Pourcentage de Gonflement.

Les figures 4.1 et 4.2, montrent que, par rapport à la courbe pour laquelle les valeurs prévues sont égales aux valeurs mesurées (courbe en pointillés appelée, improprement, première bissectrice), les résultats de certains modèles de prédiction se situent à gauche, et les résultats d'autres modèles se situent à droite de la première bissectrice. Les résultats de quelques modèles se trouvent de part et d'autre de la courbe en pointillés. Les courbes représentant les modèles de prédiction situées à droite de la première bissectrice sous-estiment le pourcentage de gonflement et celles situées à gauche de la première bissectrice sur-estiment le pourcentage de gonflement.

4.2.1.1 Méthodes Sur-Estimant le Pourcentage de Gonflement.

Les modèles dont les résultats de prédiction sont tous situés à gauche de la première bissectrice sur-estiment le pourcentage de gonflement. Les figures 4.1 et 4.2 montrent que les méthodes de NAYAK et CHRISTENSEN (1971), les méthodes de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973), et la méthode de JOHNSON (1978) sur-estiment le pourcentage de gonflement.

Pour les trois méthodes de NAYAK et CHRISTENSEN, le pourcentage de gonflement prévu est supérieur à celui mesuré pour tous les échantillons de sol. Cette sur-estimation est, peut être, due au terme du rapport de la teneur en argile sur la teneur initiale en eau. Les échantillons de sol d'IN-AMENAS sont relativement secs ($\omega_0 \approx 8\%$), et à dominance argileuse ($C \approx 60\%$); le rapport (C/ω_0), et par conséquent le pourcentage prédit de gonflement, est très élevé. Les modèles de NAYAK et CHRISTENSEN sont, peut être, mieux applicables à des sols plus humides initialement et moins argileux, le rapport (C/ω_0) est, dans ce cas, plus faible. Les valeurs des paramètres des sols d'IN-AMENAS, requis par les modèles de NAYAK et CHRISTENSEN, sont différents des sols étudiés par NAYAK et CHRISTENSEN. Le tableau 4.3 présente les caractéristiques physiques et mécaniques des sols remoulés, étudiés par NAYAK et CHRISTENSEN (1971). Le tableau 4.3 montre que:

- les limites de retrait de deux échantillons de sol sont, respectivement, supérieures aux limites de plasticité,
- pour un même échantillon de sol, la teneur initiale en eau peut varier entre l'essai de mesure du pourcentage de gonflement, et l'essai de mesure de la pression de gonflement,
- le pourcentage de gonflement augmente avec la teneur en argile,
- le pourcentage de gonflement diminue lorsque le pourcentage de grundite augmente,
- le pourcentage de gonflement diminue lorsque le pourcentage de kaolinite augmente,
- dans l'ensemble, le pourcentage de gonflement est plus grand en présence de kaolinite qu'en présence de grundite.

Tableau 4.3: Caractéristiques des Sols Etudiés par NAYAK et CHRISTENSEN (1971).

Soil type	% sand/clay	Basic clay minerals	Liquid limit (%)	Plasticity index (%)	Shrinkage limit (%)	clay content (%)	OMC* (%)	Swelling Potential		Swelling Pressure	
								Initial moisture content, w_i (%)	Measured percent swell, S_m	Initial moisture content, w_i (%)	Measured swell pressure, P_m (psi)
GB-1 1-1	70 30	ardinite	48.0	29.0	21.2	24.6	15.2	15.5	10.10	15.5	08.39
GB-1 1-2	60 40	Bentonite in ratio 1:1	63.6	42.1	18.1	32.8	16.1	16.3	15.95	16.6	14.80
GB-1 1-3	50 50	1:1	84.5	57.8	14.3	41.0	17.0	17.0	25.00	17.7	27.00
GB-2 1-1	65 35	ardinite	41.4	23.0	16.3	27.2	14.9	15.1	07.85	15.2	06.75
GB-2 1-2	50 50	Bentonite in ratio 2:1	61.0	39.7	12.5	38.8	16.1	16.1	16.10	15.8	22.90
GB-2 1-3	35 65	2:1	75.6	48.1	10.3	50.5	09.2	19.5	21.80	19.4	25.65
GB-4 1-1	50 50	ardinite	45.4	26.8	12.6	37.1	15.1	15.1	10.60	15.6	08.55
GB-4 1-2	35 65	Bentonite in ratio 4:1	55.9	31.3	10.8	48.3	16.5	17.0	13.30	16.5	13.10
GB-4 1-3	20 80	4:1	66.8	35.9	11.7	59.3	18.6	18.7	17.90	18.8	24.80
KB-1 1-1	70 30	Kaolinite	84.3	65.0	19.7	23.2	14.4	14.3	26.70	14.5	16.00
KB-1 1-2	60 40	Bentonite in ratio 1:1	107.8	86.9	17.2	30.8	16.8	16.8	37.40	17.2	22.40
KB-1 1-3	50 50	1:1	129.2	110.5	13.7	38.5	18.8	19.0	46.60	19.0	32.40
KB-2 1-1	65 35	Kaolinite	57.9	43.5	13.5	24.4	14.1	14.0	20.30	14.3	12.90
KB-2 1-2	50 50	Bentonite in ratio 2:1	83.9	67.0	14.9	34.8	16.5	16.7	27.70	16.3	19.88
KB-2 1-3	35 65	2:1	107.2	85.1	16.6	45.3	20.8	20.8	35.80	20.9	25.85
KB-4 1-1	50 50	Kaolinite	61.1	43.0	15.2	32.3	16.8	16.8	18.80	16.0	09.05
KB-4 1-2	35 65	Bentonite in ratio 4:1	70.7	49.4	17.3	42.0	19.5	19.5	23.40	19.9	13.90
KB-4 1-3	20 80	4:1	80.0	62.6	20.6	61.7	23.2	22.2	29.20	22.2	19.49

* OMC = optimum moisture content corresponding to maximum dry density of standard A. A. S. H. O compaction test.

Les intervalles auxquels appartiennent les valeurs des paramètres des sols, nécessaires pour la prédiction du pourcentage de gonflement par la méthode de NAYAK et CHRISTENSEN, sont:

sols étudiés par NAYAK et CHRISTENSEN

sols d'IN-AMENAS

14% < ω_0 < 25%

23% < C < 59%

23% < I_p < 110%

10% < W_r < 21%

41% < W_l < 130%

10% < S_m < 47%

04% < ω_0 < 14%

30% < C < 65%

35% < I_p < 58%

06% < W_r < 12%

56% < W_l < 84%

02% < S_m < 19%

Où

S_m représente le pourcentage de gonflement mesuré.

La comparaison des deux groupes de résultats (sols étudiés par NAYAK et CHRISTENSEN, et sols d'IN-AMENAS) montre que les intervalles de variation de la teneur initiale en eau et de la limite de retrait sont respectivement disjoints. Les valeurs des teneurs initiales en eau sont, dans l'ensemble, supérieures aux valeurs des limites de retrait. Cette remarque est valable aussi bien pour les sols étudiés par NAYAK et CHRISTENSEN, que pour les sols d'IN-AMENAS. Cependant, pour certain échantillon de sol, la teneur initiale en eau est inférieure à la limite de retrait. La faible teneur initiale en eau des sols d'IN-AMENAS relativement aux sols étudiés par NAYAK et CHRISTENSEN suggère une meilleure adéquation des modèles de NAYAK et CHRISTENSEN aux sols expansifs initialement humides.

Les résultats de prédiction du pourcentage de gonflement, par les trois méthodes considérées, sont, dans l'ensemble, très élevés par rapport aux observations. L'ordre de grandeur des résultats obtenus n'est pas impossible à cause de:

- la forme des expressions des modèles, donnant le pourcentage de gonflement en fonction des caractéristiques physiques du

sol. Les expressions des modèles montrent que ces derniers sont très sensibles aux valeurs des paramètres de donnée. Une légère variation d'un paramètre peut affecter sensiblement le résultat de la prédiction.

- La faible teneur en eau des sols d'IN-AMENAS. l'apparition de celle-ci au dénominateur des expressions de NAYAK et CHRISTENSEN (1971) augmente la valeur du résultat de prédiction.

La cause principale des surestimations du pourcentages de gonflement est la faible valeur de la teneur initiale en eau des sols d'IN-AMENAS. Lorsque la teneur initiale en eau approche la valeur zéro, le pourcentage de gonflement prédit tend vers l'infini, lorsque la teneur initiale en eau est grande, le pourcentage de gonflement prédit devient faible. La teneur initiale en eau doit être corrigée de sorte qu'une limite inférieure lui soit attribuée, car physiquement, un échantillon de sol initialement sec ne gonfle pas indéfiniment lorsque mis en contact de l'eau.

La figure 4.3 montre la variation du pourcentage de gonflement prédit par la méthode de NAYAK et CHRISTENSEN, en fonction du rapport (C/w_0) . Cette même figure 4.3 montre que si les pourcentages de gonflement sont limité à 160 (plus grande valeur rapportée dans la littérature, (KOMORNIK et DAVID 1969)), la teneur initiale en eau est comparable à la limites de retrait.

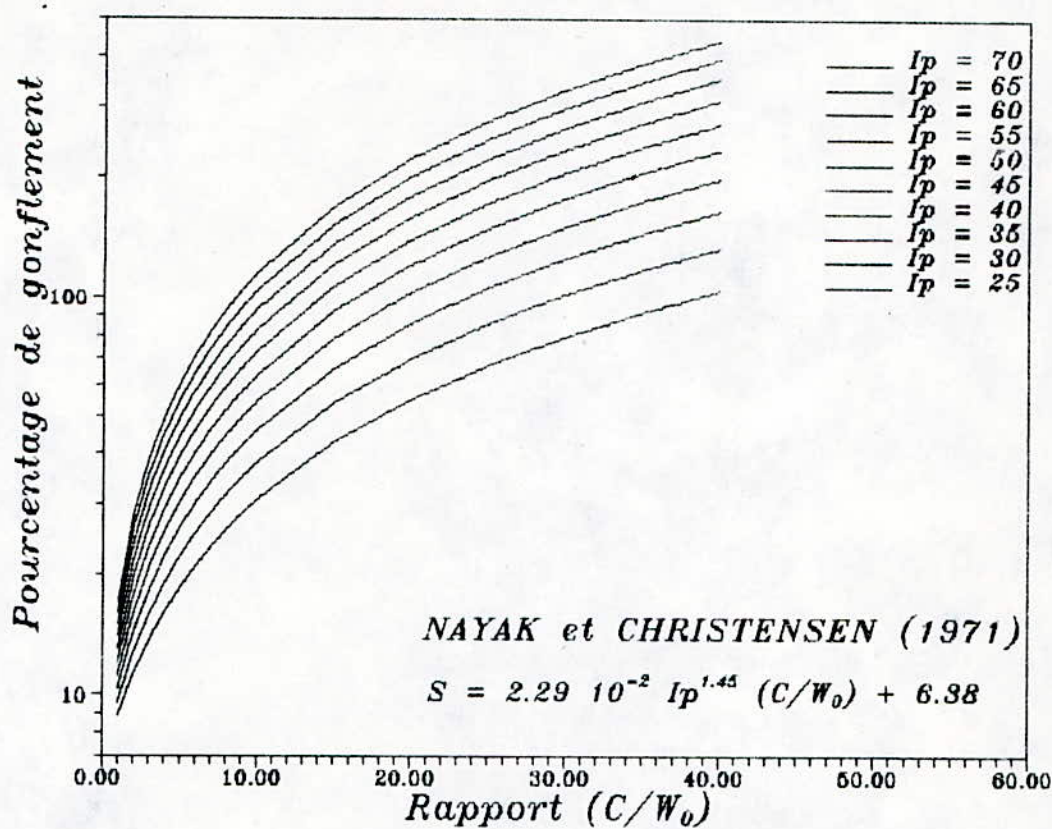


Figure 4.3: Variation du pourcentage de gonflement, prédit par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN, en fonction du rapport (C/w_0) .

Théoriquement, les modèles de NAYAK et CHRISTENSEN, utilisant respectivement la limite de liquidité, l'indice de plasticité, ou l'indice de retrait, présentent des allures similaires. Les résultats de prédiction, par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN basé sur la limite de liquidité, sont les plus élevés (relativement aux résultats des modèles basés sur l'indice de plasticité, ou l'indice de retrait), car la limite de liquidité est supérieure à l'indice de retrait, et l'indice de retrait est supérieur à l'indice de

plasticité. Pour le cas des sols d'IN-AMENAS, la prédiction basée sur l'indice de plasticité est la plus proche de la première bissectrice. Du fait de la similitude des résultats des prédictions par les trois méthodes de NAYAK et CHRISTENSEN, seul sera considéré le modèle tenant compte de l'indice plasticité, étant donné ses meilleurs résultats de prédiction, et la simplicité de la procédure expérimentale de sa détermination.

L'intervalle des limites de liquidité, des sols d'IN-AMENAS, est inclus dans l'intervalle des limites de liquidité des sols étudiés par NAYAK et CHRISTENSEN. Les intervalles de variation des limites de retrait sont presque disjoints. Les domaines de variation des pourcentages de gonflement mesurés, des sols de NAYAK et CHRISTENSEN et des sols d'IN-AMENAS, ne concourent que sur l'intervalle [10% à 19%], ce qui peut contribuer à l'inadéquation des modèles de NAYAK et CHRISTENSEN, aux sols d'IN-AMENAS. L'examen des valeurs des caractéristiques des sols d'IN-AMENAS montre que les échantillons 6, 7, et 9 sont les seuls appartenant, à la teneur initiale en eau près, aux intervalles des sols étudiés par NAYAK et CHRISTENSEN. Malgré ce fait, les résultats des prédictions sont loin des mesures expérimentales.

Les coefficients apparaissant dans les modèles de NAYAK et CHRISTENSEN ont été trouvés moyennant une analyse statistique faisant intervenir les valeurs des résultats d'essais sur des sols appartenant à une certaine classe (voir tableau 4.3). Ces mêmes coefficients peuvent changer si la même analyse est reprise pour le cas des sols d'IN-AMENAS. Les méthodes de NAYAK et CHRISTENSEN ont été établies à partir de résultats d'essais sur des échantillons de sols artificiellement préparés, les sols faisant objet de la présente étude sont naturels. La différence entre les structures des deux catégories de sols contribue à la non conformité des résultats de prédictions aux mesures expérimentales.

La reconstitution des échantillons de sol au laboratoire sous-entend une connaissance préalable de certaines

caractéristiques du sol (teneur initiale en eau, degrés de saturation, poids volumique sec), ce qui peut faciliter l'interprétation des résultats d'essais ou de prédiction. Pour les sols naturels intacts, l'identification rigoureuse de leur nature, et de certaines grandeurs physiques telles que les poids volumiques et la teneur en eau, constitue, déjà, un travail énorme. Dans les sols intacts, et dans les sols reconstitués au laboratoire, la disposition des particules les unes par rapport aux autres; autrement dit, la structure interne n'est pas bien connue. Pour les dépôts sédimentaires, les particules sont généralement disposés de manière litée. Les sols reconstitués au laboratoire à une teneur en eau supérieure à l'optimum Proctor présentent une structure plus ordonnée que les sols reconstitués à une teneur en eau inférieure à l'optimum Proctor. Cette disposition des particules affecte considérablement le comportement des sols.

L'expression du modèle (1) de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973) montre que le pourcentage de gonflement est proportionnel à la limite de liquidité, et est inversement proportionnel à la teneur initiale en eau de l'échantillon de sol avant essai. Ces relations de proportionnalité sont expérimentalement démontrables. L'indice de liquidité d'un sol expansif augmente lorsque celui-ci gonfle par suite d'adsorption d'eau entre les particules constituant le sol. Cependant, d'autres paramètres du sol, tels que la cohésion, la granulométrie, la forme des particules, et leurs dispositions les unes par rapport aux autres, peuvent intervenir et affecter le potentiel de gonflement du sol.

Pour les sols de la Palestine (étudiés par VIJAYVERGIYA et GHAZZALY) les valeurs des paramètres physiques, nécessaires pour la prédiction, sont étalées sur des intervalles larges. La largeur, des plages auxquelles appartiennent les valeurs des caractéristiques des sols de la Palestine, peut indiquer que le modèle de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY est applicable à une large classe de sols. Cependant, la faible corrélation des résultats de prédiction par le modèle de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY avec les

mesures expérimentales sur les sols d'IN-AMENAS indique que les coefficients figurant dans l'expression (1) de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY sont affectés, de manière indirecte, par les caractéristiques du sol.

L'expression (1) de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY montre que lorsque la teneur initiale en eau tend vers zéro le pourcentage de gonflement tend vers une valeur finie, mais très grande. L'expression du modèle en question devrait être rectifiée de sorte à limiter le pourcentage de gonflement à la plus grande valeur observée, et remplacer ainsi la teneur initiale en eau par une autre teneur en eau intrinsèque du sol (fonction de la limite de retrait, de la limite de plasticité, ou de la limite de liquidité). Comme pour le cas du modèle de NAYAK et CHRISTENSEN (1971), si le pourcentage de gonflement, prédit par le modèle (1) de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY, doit être limité à une valeur supérieure ou égale à 160, la "teneur initiale en eau" doit être supérieure à $0.4\omega_l - 20.95$. La figure 4.4 montre la variation du pourcentage de gonflement, prédit par VIJAYVAERGIYA et GHAZZALY, en fonction de la teneur initiale en eau. La figure 4.4 montre que lorsque le pourcentage de gonflement des échantillons de sol étudiés, est limité à 160, la teneur initiale en eau doit, globalement être supérieure à la limite de retrait. Le modèle (2) de VIJAYVAERGIYA et GHAZZALY tient compte du poids volumique sec, et de la limite de liquidité de l'échantillon de sol. Ces deux grandeurs ne donnent aucune indication quant à l'état d'humidité du sol. La connaissance du poids volumique humide aurait permis d'avoir une idée sur l'état de densité, et d'humidité du sol.

Pour la méthode de JOHNSON (1978), figure 4.2, la sur-estimation des paramètres de gonflement semble être due au fait que cette méthode est adaptée aux prédictions sur site plutôt qu'aux mesures de laboratoire. La hauteur de la couche gonflante a été prise égale à l'épaisseur de l'échantillon de sol. Sur le site, l'épaisseur à considérer est la profondeur (H) de la couche gonflante .

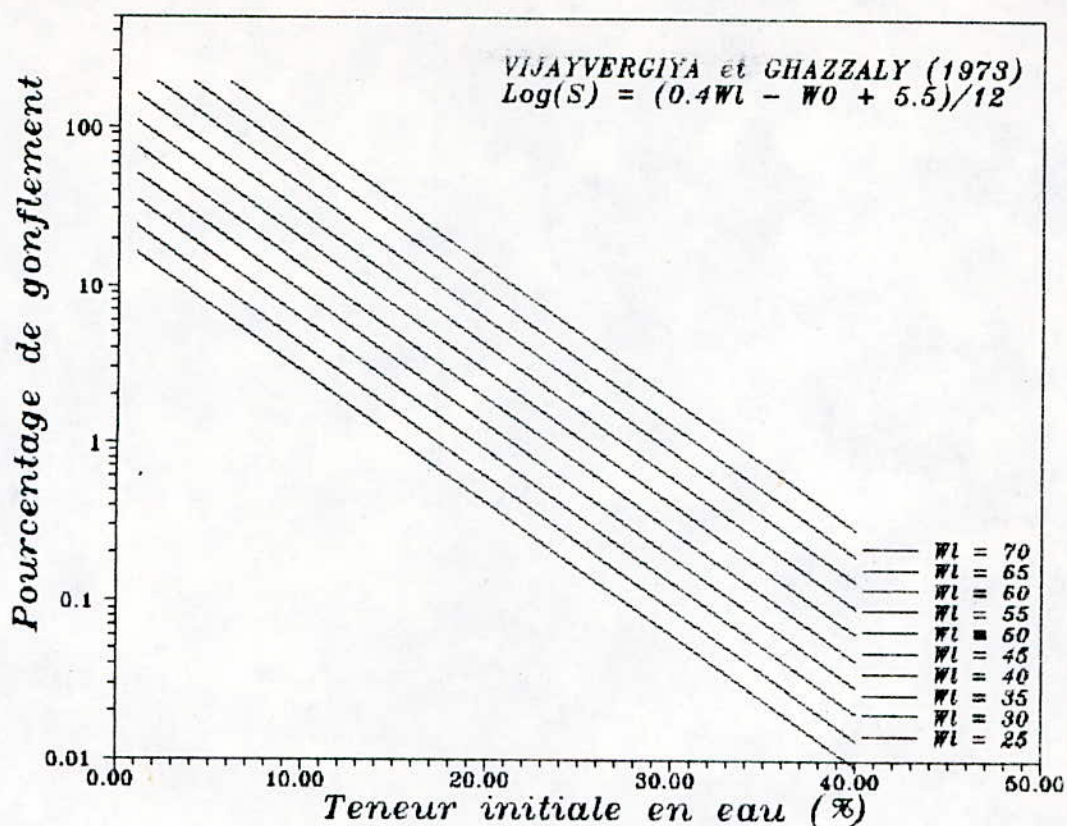


Figure 4.4: Variation du pourcentage de gonflement, prédit par le modèle (1) de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY, en fonction de la teneur initiale en eau.

En géotechnique la rencontre d'une couche de sol gonflant reposant sur une autre couche de sol non gonflant est rare. Dans ce cas, la profondeur à considérer serait l'épaisseur de la couche gonflante. Le site d'IN-AMENAS, investigué dans le cadre de cette étude, est un dépôt géologique datant du Lias, et dont la profondeur s'étant à quelque 250 mètres. L'épaisseur de couche retenue pour la prédiction du gonflement par la méthode de JOHNSON est la profondeur de la couche active, c'est à dire l'épaisseur de couche présentant, effectivement, des déformations de gonflement compte tenu des conditions physiques du sol, et des conditions du milieu environnant. Les conditions physique du sol regroupent:

- la perméabilité,
- la granulométrie, et
- l'état de consolidation.

Les conditions du milieu environnant regroupent:

- les conditions climatiques, et
- les conditions de recouvrement.

La couche active est, par définition, la profondeur minimum des deux valeurs suivantes:

- la profondeur à partir de laquelle les variations de teneur en eau sont nulles,
- la profondeur à partir de laquelle le gonflement du sol n'est plus possible compte tenu du poids des terres sus-jacentes.

La détermination de l'épaisseur de couche à partir de laquelle les variations de teneur en eau sont nulles, requiert des observations pendant, au moins, une année, c'est pourquoi la méthode de JOHNSON n'est pas qualifiée de rapide. Cependant, si une durée d'au moins une année est nécessaire pour déterminer l'épaisseur de la couche gonflante, cette période est nettement plus rentable si elle est exploitée pour observer le gonflement sur site.

La prise en compte de la hauteur de la couche gonflante de sol sous-entend la considération du poids des terres sus-jacentes. Le pourcentage de gonflement, mesuré sur site, serait réduit par rapport à celui déterminé par essai de laboratoire. Si l'épaisseur du sol gonflant n'est pas importante, il est généralement admis que le gonflement est le même quelque soit la profondeur. Cependant, le poids des terres peut affecter le pourcentage de gonflement; les particules se trouvant en surface sont plus libres de gonfler que celles se trouvant plus en profondeur. La méthode de JOHNSON prévoit, donc, le gonflement moyen d'une couche de sol expansif sur site. La sur-estimation du pourcentage de gonflement par le modèle de JOHNSON semble être étroitement liée à l'épaisseur de couche. Le modèle serait convenable à partir d'une certaine épaisseur de couche. Dans le modèle de JOHNSON, lorsque la teneur initiale en eau tend vers zéro, le pourcentage de gonflement reste fonction de l'indice de plasticité, et de l'épaisseur de couche. Cette caractéristique du modèle de JOHNSON le rend mieux applicable aux sols expansifs secs. En outre, la méthode de JOHNSON fait intervenir l'indice de plasticité du sol, les échantillons étudiés

dans le cadre de ce projet sont plastiques ($I_p \approx 50\%$), ce qui a contribué à l'augmentation des valeurs du pourcentage de gonflement prévu.

La méthode de JOHNSON est proposée sous forme de deux expressions mathématiques selon que l'indice de plasticité du sol soit supérieur ou inférieur à 40 %. L'indice de plasticité étant, lui-même, fonction du type et de la teneur en argile de l'échantillon de sol.

Les résultats de prédiction du pourcentage de gonflement par le modèle de SCHNEIDER et POOR (1978) n'ont pas pu être représentés graphiquement, avec les résultats des autres modèles, à cause de leurs grandes valeurs. Cependant, les résultats sont donnés, en chiffres, sur le tableau 4.2. L'expression du modèle de SCHNEIDER et POOR montre que celui-ci est très sensible à la teneur initiale en eau (voir tableaux 3.1, et 4.2). Le pourcentage de gonflement est proportionnel à l'indice de plasticité, et est inversement proportionnel à la teneur initiale en eau. La figure 4.5 montre la variation du pourcentage de gonflement en fonction de la teneur initiale en eau, compte tenu de l'indice de plasticité. La figure 4.5 montre que le pourcentage de gonflement est d'autant plus élevé que la teneur initiale en eau est faible, et l'indice de plasticité est grand.

Si le plus grand pourcentage de gonflement rapporté dans la littérature est de 160, cette valeur sera attribuée à la plus grande valeur de l'indice de plasticité étant donné la "proportionnalité" entre ces deux grandeurs. Lorsque l'indice de plasticité diminue, et la teneur initiale en eau augmente, le pourcentage maximum de gonflement diminue (voir figure 4.5). Si le pourcentage de gonflement doit être inférieur à 160, la teneur initiale en eau doit être supérieure à $0.265I_p$, soit $I_p/4$. Le raisonnement précédent indique que si la teneur initiale en eau est inférieure au quart de la valeur de l'indice de plasticité, elle doit être remplacée par $I_p/4$.

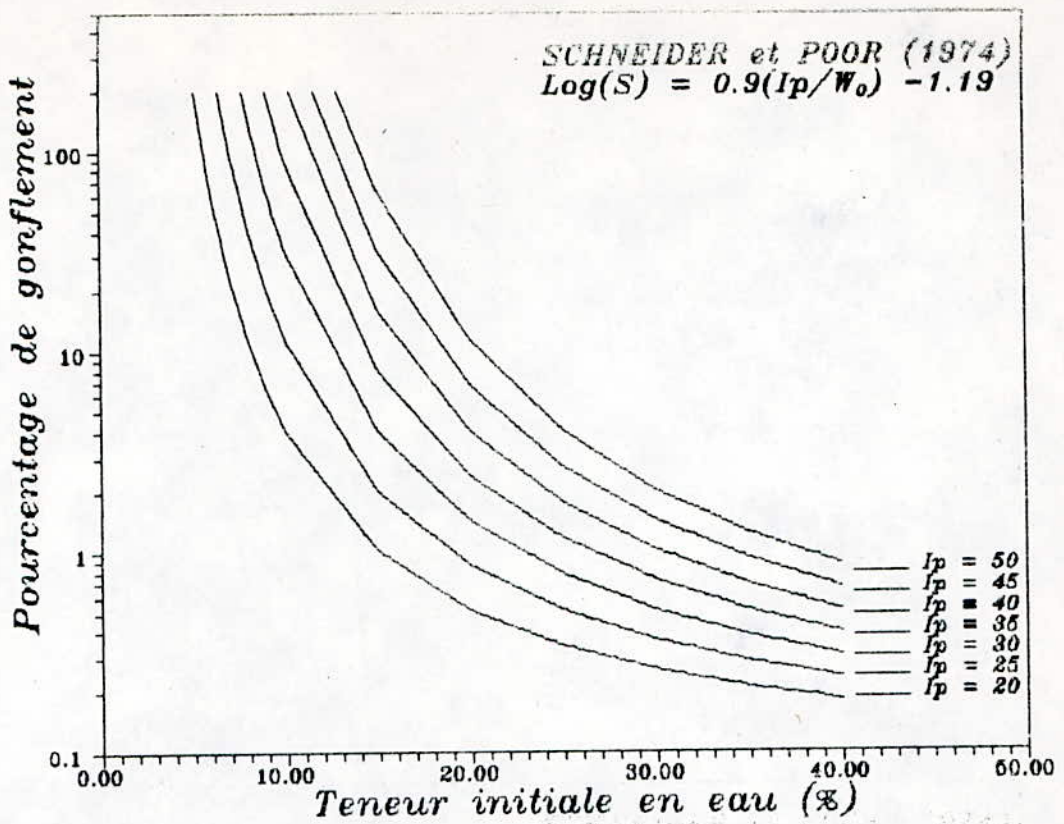


Figure 4.5: Variation du Pourcentage de Gonflement, Prédit par SCHNEIDER et POOR, en Fonction de la Teneur Initiale en eau.

Pour les sols expansifs d'IN-AMENAS, toutes les teneurs initiales en eau sont inférieures à $I_p/4$, ce qui conduit à prédire la même valeur du pourcentage de gonflement, pour tous les sols étudiés (pourcentage de gonflement = 160). Ce dernier résultat appuie l'inadéquation du modèle de SCHNEIDER et POOR aux sols expansifs d'IN-AMENAS. Après optimisation des coefficients du modèle de SCHNEIDER et POOR, de meilleurs résultats de prédiction sont possibles.

Dans les modèles tenant compte de la teneur initiale en eau, celle-ci apparaît généralement au dénominateur (NAYAK et CHRISTENSEN, SCHNEIDER et POOR). Le gonflement d'un sol expansif est amorcé par suite d'une augmentation de la teneur en eau. La teneur en eau, juste avant essai de gonflement, est insuffisante pour prédire le gonflement d'un échantillon de sol. La variation de la teneur en eau, entre deux dates bien "espacées", peut être nulle. La teneur en eau peut changer dans cet intervalle de temps. Une variation de volume du sol est possible à cause de la variation

de teneur en eau. La variation du volume, en fonction de la teneur en eau, est irréversible. La variation de la teneur en eau d'un sol expansif, dans le temps, peut donner une meilleure idée sur les variations de volume.

L'inconvénient majeur des méthodes empiriques est le risque de défaut de fiabilité une fois appliquées à des sols autres que ceux ayant servi à leur établissement. Un tel problème peut être résolu si les coefficients recherchés sont, statistiquement, déterminés pour chaque site étudié.

4.2.1.2 Méthodes Sous-Estimant le Pourcentage de Gonflement.

Les résultats des méthodes sous-estimant le pourcentage de gonflement sont, situés à droite de la première bissectrice. Les figures 4.1 et 4.2 montrent que peu de méthodes sous-estiment complètement le pourcentage de gonflement. La méthode de RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965) peut être classée parmi les méthodes sous-estimant le pourcentage de gonflement, vu qu'elle présente un seul point (sur Seize) situé légèrement à gauche de la première bissectrice.

La méthode de RANGANATHAM et SATYANARAYANA (figure 4.2) fait intervenir l'indice de retrait, la teneur en argile et le paramètre (n) égal à la teneur en argile pour laquelle l'indice de retrait est nul. le paramètre (n) est déduit de l'abaque de SEED et al. (1962), compte tenu de la nature minéralogique des particules constituant le sol. Dans le cadre de cette étude, le paramètre (n) a été pris égal à 10 % pour tous les échantillons de sol considérés compte tenu de la composition minéralogique de ces derniers. En pratique, le paramètre (n) est compris entre 8 % et 13 %. Le modèle de RANGANATHAM et SATYANARAYANA prévoit une augmentation du pourcentage de gonflement avec la teneur en argile. Les minéraux argileux expansifs, tels que la Montmorillonite, présentent une surface spécifique nettement plus importante que les minéraux non expansifs. La finesse, des particules constituant un sol expansif,

donne une idée sur la quantité d'eau nécessaire pour affaiblir les forces d'attraction dues à l'eau liée. Chaque particule de sol nécessite une certaine quantité d'eau pour son humidification. La surface spécifique peut indiquer la possibilité d'un gonflement du sol. Le point correspondant à l'échantillon 2, est situé légèrement à gauche de la première bissectrice à cause de sa faible teneur en argile (29.9 %) et de la grandeur de son indice de retrait relativement à tous les autres échantillons de sol, ces paramètres, lorsqu'introduits dans l'expression de RANGANATHAM et SATYANARAYANA, donnent, naturellement, la plus grande valeur du pourcentage de gonflement vu la forme de l'expression du modèle.

Dans l'intervalle de gonflement des sols [1.5% à 7%], la méthode de RANGANATHAM et SATYANARAYANA prédit convenablement le pourcentage de gonflement des sols étudiés. L'intervalle auquel appartiennent les indices de retrait des sols d'IN-AMENAS est inclus dans l'intervalle des indices de retrait des sols pour lesquels ce modèle a été développé. En considérant la teneur en argile, seul l'échantillon (2) appartient à l'intervalle des teneurs en argile des sols de RANGANATHAM et SATYANARAYANA. La remarque précédente, sur l'échantillon 2, est insuffisante (point de vue nombre d'échantillons) pour généraliser la bonne estimation du pourcentage de gonflement, par le modèle de RANGANATHAM et SATYANARAYANA, pour les sols expansifs dont $8 \leq I_r \leq 13.2$, et $15 \leq C \leq 38$.

4.2.1.3 Méthodes Intermédiaires.

Les méthodes, qui parfois sur-estiment, et parfois sous-estiment le pourcentage de gonflement, sont désignées par méthodes intermédiaires. Les points représentant les résultats de ces méthodes de prédiction sont situées de part et d'autre de la première bissectrice (figure 4.1 et/ou 4.2). Ces méthodes prévoient, pour l'ensemble des échantillons de sol, des pourcentages de gonflement parfois plus petits, et parfois plus grands que ceux mesurés. Pour l'ensemble de ces méthodes, la discussion, et l'interprétation de chaque résultat est nécessaire

pour mieux cerner les paramètres ayant affecter la forme de la courbe représentative. Les figures (figure 4.1, et figure 4.2) montrent que les méthodes intermédiaires sont: la méthode de SEED et al.(1962), la méthode de VAN DER MERWE (1964), la méthode de FREDLUND.D (1974), la méthode de JOHNSON (1978), la méthode de SCHNEIDER et POOR (1983), et la méthode d'ABDULMOHSIN.W.DHOWIAN (1990).

Les résultats de prédiction par la méthode de VAN DER MERWE (figure 4.2) sont presque les mêmes, quelque soit l'échantillon de sol considéré. Le potentiel d'expansivité de la plus part des échantillons de sol est égal à la valeur maximale donnée par le diagramme de WILLIAMS (soit 8.33 %). La méthode de VAN DER MERWE tient compte de trois caractéristiques de l'échantillon de sol: l'indice de plasticité, la teneur en argile, et la profondeur d'échantillonnage. Dans le cadre de cette étude, la profondeur d'échantillonnage des sols considérés est prise égale à la profondeur équivalente à la contrainte due au poids du piston de la cellule oedométrique. Un modèle quelconque ne peut tenir compte de tous les paramètres régissant un phénomène donné. Toutefois, la méthode de VAN DER MERWE semble négliger des paramètres étroitement liés au gonflement du sol. La teneur initiale en eau, et le poids volumique du sol sont des exemples de ces paramètres.

La méthode de VAN DER MERWE fait intervenir un coefficient (k) dépendant de la profondeur. Le coefficient k représente l'état de contrainte au point considéré. Le coefficient (k) est déterminé expérimentalement par la méthode du double oedomètre. Si le coefficient (k) doit être déterminé pour chaque point d'échantillonnage, la méthode de VAN DER MERWE revient à une mesure directe du pourcentage de gonflement sur site plutôt qu'une méthode de prédiction de ce dernier. Selon VAN DER MERWE, le potentiel d'expansibilité dépend de la teneur en argile et de l'indice de plasticité. Cette dépendance est nécessaire mais non suffisante, car un sol plastique et compressible peut se situer sur le diagramme de WILLIAMS (méthode de VAN DER MERWE) dans la région des sols à

très haut potentiel d'expansivité (voir figure 4.5).

Le potentiel d'expansivité, tel que montré sur le diagramme de WILLIAMS, présente le défaut de suivre une variation discrète, fonction de l'indice de plasticité et de la teneur en argile. une légère diminution de l'indice de plasticité peut faire passer un sol d'une très forte expansivité à une faible expansivité, sans passage par un état intermédiaire. C'est ainsi que la méthode de VAN DER MERWE présente quelques défauts de prédiction du pourcentage de gonflement des sols expansifs. Les résultats de la prédiction du pourcentage de gonflement, par la méthode de VAN DER MERWE, seront meilleurs si le potentiel d'expansibilité varie de manière continue, en fonction de l'indice de plasticité, et de la teneur en argile.

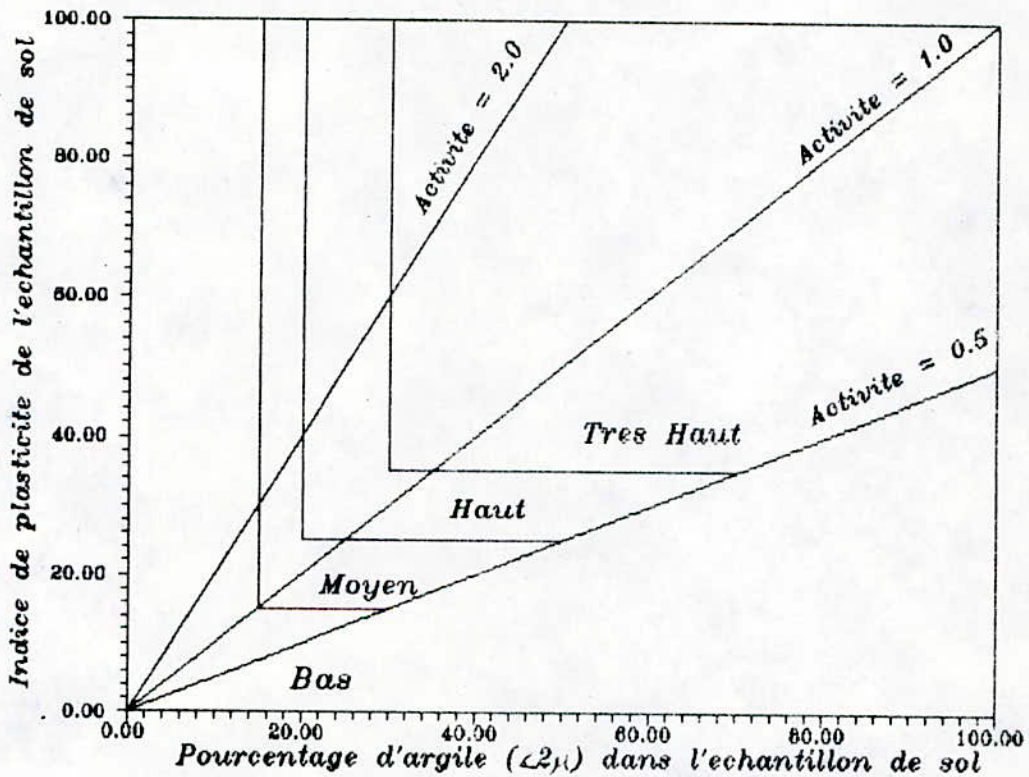


Figure 4.5: Variation du potentiel d'expansibilité selon WILLIAMS.

La méthode de FREDLUND.D (1983) prévoit des résultats très inférieurs aux mesures expérimentales à l'exception de l'échantillon 1 (figure 4.1). La méthode de FREDLUND.D (1983)

resssemble, dans ses résultats, dans la forme de sa courbe représentative, ainsi que dans son expression mathématique à celle d'ABDELMUHSIN.W.DHOWIAN (1990). La portion de la courbe qui joint les points représentant les échantillons 2,3,4 et 5 paraît parallèle à la première bissectrice, ce qui permet de trouver une relation entre le pourcentage de gonflement prévu et celui mesuré. Cette relation peut être introduite dans l'équation du modèle de FREDLUND.D pour donner une expression mathématique plus appropriée pour la prédiction du pourcentage de gonflement des sols appartenant à l'intervalle concerné (pourcentage de gonflement mesuré [04% à 12%]). A l'extérieur de cet intervalle, les prévisions ne sont pas satisfaisantes, elles tendent, parfois, vers zéro alors que le gonflement mesuré approche les 20%. Ce défaut d'exactitude est la conséquence de la forme de l'expression du modèle de FREDLUND.D; le logarithme du rapport de la pression de préconsolidation sur la pression des terres est parfois proche de zéro du fait que ces deux pressions sont, dans certains cas, voisines. La méthode de FREDLUND.D n'est, donc, pas adéquate aux sols expansifs normalement consolidés pour qui la pression des terres et la pression de préconsolidation sont égales.

L'échantillon de sol (1) est situé légèrement à gauche de la première bissectrice probablement à cause de son faible indice des vides relativement aux autres échantillons de sol. Le gonflement "apparent" d'un sol expansif est d'autant plus faible que l'indice des vides de ce dernier est élevé. Ceci étant dû à "l'encaissement" du gonflement par les vides interparticulaires. Le gonflement apparent d'un sol poreux est, par conséquent, faible.

La méthode d'ABDELMUHSIN.W.DHOWIAN (1990) prévoit une valeur presque constante pour l'ensemble des échantillons de sol. Dans l'intervalle [6% à 14%] des pourcentages de gonflement mesurés, le modèle approche la première bissectrice. Dans l'étude d'ABDELMUHSIN W.DHOWIAN, sur les sols d'Arabie Saoudite, les meilleurs résultats de prédiction du pourcentage de gonflement sont relatifs à l'intervalle [4% à 11%] des valeurs mesurées du gonflement, et pour

des profondeurs d'échantillonnage de 1.5 mètres à 3.5 mètres. Les échantillons de sol, de la présente étude, et dont les prédictions sont de l'ordre de grandeur des mesures expérimentales (éch 2, 3 et 4), sont extraits à des profondeurs de 1.25 mètres à 3.9 mètres. Cependant, cette profondeur est remplacée par la profondeur équivalente au poids du piston de la cellule oedométrique. A l'extérieur de l'intervalle [6%, 14%] des valeurs mesurées du pourcentage de gonflement, le modèle simule mal le gonflement des sols étudiés. Dans l'intervalle [6%, 14%] La méthode d'ABDELMUHSIN W.DHOWIAN prédit correctement le pourcentage de gonflement. Cette qualité de prédiction est, probablement, due à la ressemblance dans des paramètres, tels que l'indice des vides, le coefficient de gonflement, et le poids volumique, ainsi que dans leurs aspects extérieurs (état de fissuration, ...), entre les sols originaux et les sol d'IN-AMENAS.

D'après l'expression d'ABDELMUHSIN.W.DHOWIAN, le gonflement des sols expansifs est lié à la pression de gonflement, ce qui n'est pas toujours le cas. De manière générale, ces deux grandeurs peuvent être liées, comme elles peuvent ne pas l'être (NAYAK et CHRISTENSEN 1971).

Théoriquement, si le gonflement sous charge (égale à la pression effective sur site par exemple) est mesuré au lieu du gonflement libre, comme suggéré par l'auteur du modèle, les points situés à gauche de la première bissectrice (sous-estimant le pourcentage de gonflement) seront plus proches de celle-ci. Cependant, les points situés à droite de la première bissectrice s'éloigneront d'avantage de celle-ci. Cette façon de procéder rendra le modèle plus convenable pour le cas des sols faiblement expansifs. En revanche, le modèle sera, probablement, inadéquat aux sols d'expansion moyenne à forte. La méthode d'ABDELMUHSIN.W.DHOWIAN (figure 4.1), simule convenablement les valeurs mesurées dans l'intervalle [7%, 14%]. Le modèle d'ABDELMUHSIN W.DHOWIAN pourrait satisfaire les deux cas s'il est procédé de la manière suivante:

- pour les sols fortement expansifs (pourcentage de gonflement

supérieur à 12%), le gonflement libre est mieux prédit par le modèle,

- pour les sols moyennement expansifs (pourcentage de gonflement allant de 7% à 10%), c'est le gonflement sous charge qui est mieux prédit.

Si cette façon de faire est admise, et pour appliquer l'une ou l'autre des suggestions, un procédé (autre que la mesure directe) est nécessaire pour évaluer le pourcentage d'expansion du sol. Les systèmes de classification des sols expansifs, compte tenu de leurs caractéristiques physiques, sont généralement nécessaires pour ce faire. Le modèle d'ABDELMUHSIN. W. DHOWIAN s'inspire de la théorie de consolidation qui fait intervenir la contrainte effective exercée sur le sol, et la contrainte de préconsolidation de celui-ci.

Le modèle d'ABDELMUHSIN. W. DHOWIAN nécessite la connaissance préalable du coefficient de gonflement. De ce fait, le modèle d'ABDELMUHSIN W. DHOWIAN est une technique d'anticipation du résultat mesuré plutôt qu'une méthode de prédiction. La détermination du coefficient de gonflement nécessite, théoriquement, un essai oedométrique, ce qui revient à faire une mesure directe du gonflement. Le modèle de l'auteur serait préconisé pour la prédiction du gonflement sur site car au laboratoire, la mesure du pourcentage de gonflement est facile parallèlement à la mesure du coefficient de gonflement.

Les courbes représentatives des méthodes (1 et 2) de SEED et al. (1962) sont presque confondues. L'allure des deux courbes montre une légère amplification de l'une par rapport à l'autre. Comme dans le cas des méthodes de RANGANATHAM et SATYANARAYANA, cette amplification était possible. La similitude des deux allures est due au fait que la méthode (1), de SEED et al., fait intervenir l'activité et la teneur en argile de l'échantillon de sol, et que la méthode (2) fait intervenir l'indice de plasticité de l'échantillon de sol. La décomposition, dans l'expression (1), du terme de l'activité (égal au rapport de l'indice de plasticité sur

la teneur en argile) montre que les deux expressions sont identiques (à la teneur en argile près). Pour des échantillons d'un même sol, les prédictions par les méthodes de SEED et al. sont, pour l'ensemble des échantillons, des amplifications l'une de l'autre. Ce qui signifie que les deux méthodes reposent sur des idées voisines. Les deux courbes de SEED et al. sont pratiquement les mêmes à l'exception de l'échantillon (2) pour lequel la prédiction, selon la méthode, (2) est deux fois plus grande que celle par la méthode (1). Le résultat est une conséquence de la faible valeur de la teneur en argile de l'échantillon (2) relativement aux autres échantillons. Cette faible valeur de la teneur en argile diminue les valeurs des résultats de prédiction par la méthode (1) relativement à celle de la méthode (2). Les résultats de prédiction par le modèle (1) sont, dans l'ensemble, les mêmes que ceux du modèle (2) malgré la prise en compte de la teneur en argile, dans le modèle (1). Les modèles de SEED et al. sont, probablement, plus convenables pour des sols à faible indice de plasticité, et ce pour un pourcentage de gonflement mesuré supérieur à 14%. Un faible indice de plasticité implique, entre autres, une faible teneur en oxydes dans le sol (oxyde de Calcium, oxyde de Potassium, ou oxyde de Sodium).

4.3.1.4 Comparaison des Résultats de Prédiction aux Mesures par Divers Procédures Expérimentales

Le sol 5 a fait objet d'une étude expérimentale intense (TAS 1992). Le tableau 4.4 montre les résultats de divers essais de gonflement sur le sol 5. Le sol 6 correspond à l'argile 1 sur le tableau 4.4. Le tableau 4.4 montre que le potentiel de gonflement varie considérablement selon la procédure de l'essai de gonflement. Les figures 4.7, et 4.8 montrent les différentes valeurs mesurées, et prédites du pourcentage de gonflement du sol 5. Les figures 4.7, et 4.8 montrent que le pourcentage de gonflement est le mieux prédit selon les cas mentionnés sur le tableau 4.5.

Tableau 4.4: Caractéristiques des Argiles d'IN-AMENAS, et Présentation des Résultats des Essais Effectués.

Type d'essai	Type d'argile	Série d'essai	Echant. N°	ϕ / H [mm/mm]	Po [Bar]	Type de bâti	e_0	e_{max}	$\Delta H/H$ [%]	$(\Delta H/H)_{moy}$ [%]	PG [Bar]	$(PG)_{moy}$ [Bar]	Ts [j]	Rapport H / ϕ	$H_f - H_s$ Ws	Tf [j]	
GONFLEMENT LIBRE	ARGILE 1	S1	E1	50/19	0.07	Bishop Charge-ment par l'arrière	0.292	0.481	14.63	13.43	22.22	23.30	08	0.380	0.0907	18	
			E2	50/19			0.292	0.470	13.74		23.00		10		0.0885	21	
			E3	50/19			0.295	0.450	11.93		24.70		10		0.0841	22	
		S2	E4	70/19	0.015	Anglais Chargem-ent par l'avant	0.291	0.550	20.05	19.83	28.50	19.83	08	0.270	0.0540	21	
			E5	70/19			0.289	0.509	17.10		29.50		08		0.0495	113	
			E6	70/19			0.292	0.580	22.33		27.00		10		0.0560	113	
		S3	E7	75/19	0.02		0.291	0.520	17.80	18.22	32.88	18.22	11	0.253	0.0440	21	
			E8	75/19			0.291	0.530	18.63		37.24		06		0.0450	17	
		S4	ARGILE 2	E9	50/19	0.07	l'avant	0.297	0.736	33.85	---	66.50	---	09	0.380	0.1390	51
			ARGILE 3	E10	50/19			0.320	0.699	29.00		26.86		11		0.1330	22
			ARGILE 4	E11	50/19			0.298	0.729	33.20		68.00		07		0.1370	43
		Gonflement sous le poids des terres	ARGILE 1	S5	E12	50/19	0.40	Bishop Charge-ment par l'avant	0.291	0.393	07.92	---	22.56	---	15	0.380	0.0380
E13	50/19				0.290	0.393			07.80	21.79	08		0.0380		18		
E14	50/19				0.292	0.404			08.84	25.00	08		0.0390		18		
Gonflement sous une charge constante	ARGILE 1	S6	E15	70/19	05	Anglais Chargem-ent par l'avant	0.278	0.294	0.274	---	---	---	07	0.270	0.0284	54	
			E16	70/19	10		0.264	0.274	-1.31		18.64		07		0.0265	81	
			E17	70/19	20		0.264	0.265	-1.98		19.1		07		0.0260	81	
Gonflement libre apr. un cycle charge-décharge	ARGILE 1	S7	E18	70/19	0.015 (16)	Anglais Chargem-ent par l'avant	0.283	0.563	20.96	---	18.05	---	41	0.270	0.0540	59	
			E19	70/19	0.015 (16)		0.261	0.590	23.06		26.64		29		0.0570	48	
			E20	70/19	0.015 (25)		0.278	0.550	20.01		14.57		29		0.0530	48	
			E21	50/19	0.020 (6)		0.287	0.451	12.96		32.40		41		0.0870	59	
Gonf. libre (trousses graissées)	ARGILE 1	S8	E22	70/19	0.015	Chargem-ent par l'avant	0.292	0.592	23.20	---	24.50	---	28	0.270	0.0570	51	
			E23	50/19			0.291	0.452	12.50		23.10		28		0.0860	51	
Gonflement libre	ARGILE 1	S9	E24	50/19	0.019	Bishop	0.406	0.640	16.65	---	20.00	---	06	0.380	0.1208	16	
			E25	70/24	0.048	M & O	0.406	0.735	23.37		25.50		06		0.343	0.0707	17

Où: Po: Pression initiale.

e_0 : Indice des vides initial.

e_{max} : Indice des vides final.

$\Delta H/H$: Taux de gonflement.

$(\Delta H/H)_{moy}$: Taux moyen de gonflement.

PG: Pression de gonflement.

$(PG)_{moy}$: Pression moyenne de gonflement.

Hf: Hauteur finale.

Hs: Hauteur des grains solides.

Ws: Poids solide.

Ts: Durée de stabilisation du gonflement.

Tf: Durée totale de l'essai.

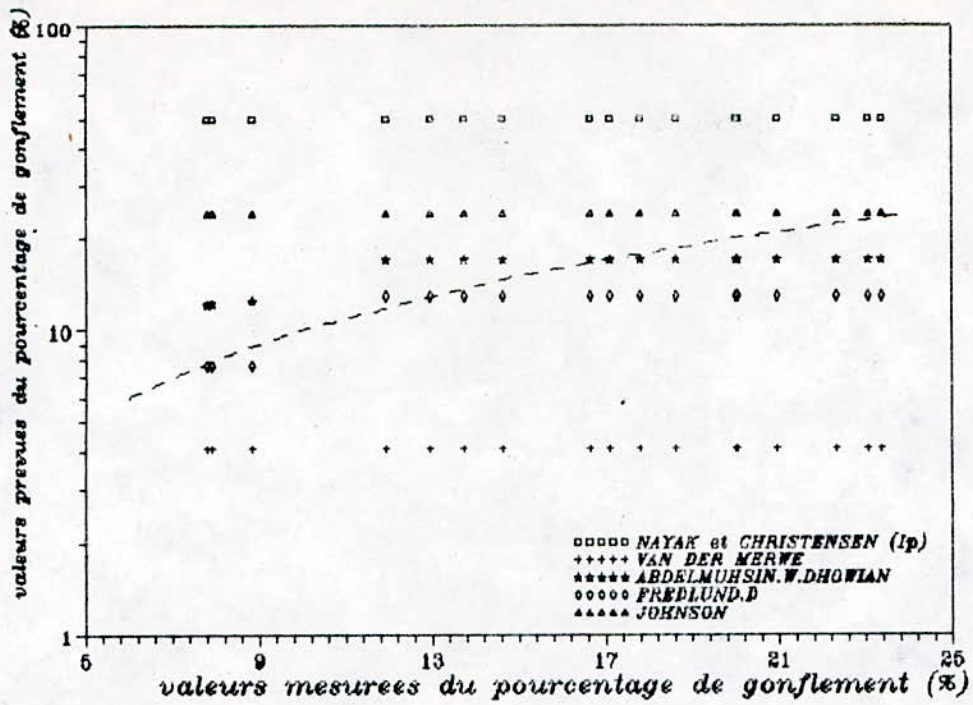


Figure 4.7: Prédiction du Pourcentage de Gonflement de l'Echantillon G (Argile 1), par les Auteurs Cités Dans la Légende, et Résultats de Mesures par Diverses Procédures Expérimentales.

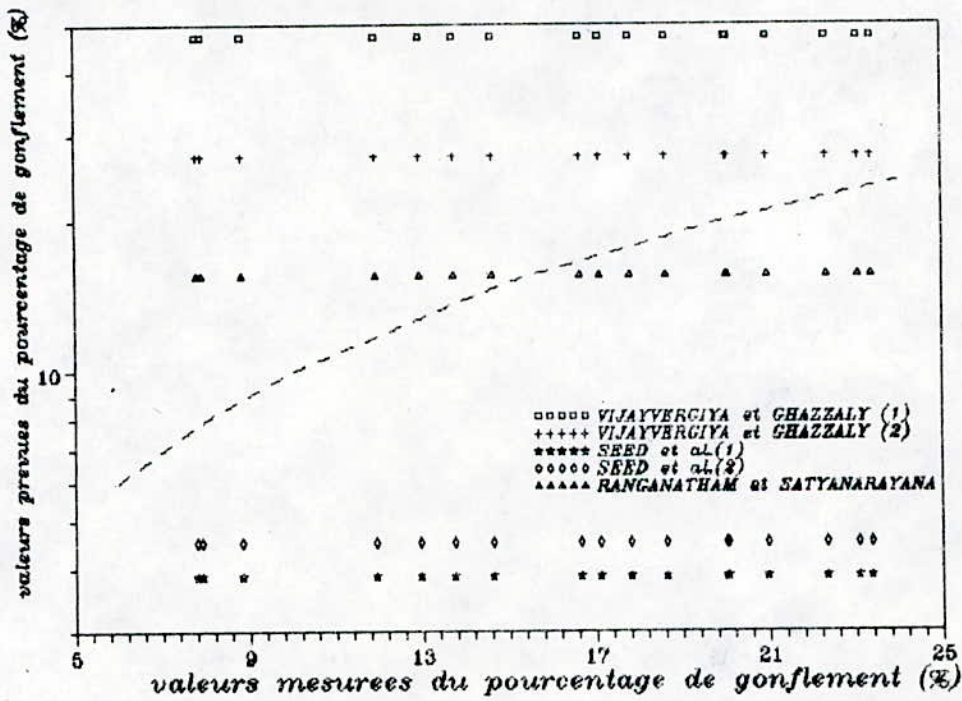


Figure 4.8: Prédiction du Pourcentage de Gonflement de l'Echantillon G (Argile 1), par les Auteurs Cités Dans la Légende, et Résultats de Mesures par Diverses Procédures Expérimentales.

Tableau 4.5: Echantillons de sol expansif d'IN-AMENAS pour lesquels le pourcentage de gonflement prédit, par divers auteurs, est le plus proche du pourcentage de gonflement mesuré au laboratoire.

modèle de prédiction	échantillon de sol	valeur prédite (%)	valeur mesurée (%)	ϕ/H (mm/mm)
FREDLUND	E2	12.88	13.74	50/19
FREDLUND	E12	07.64	07.92	50/19
ABDELMUHSIN	E5	17.00	17.10	70/19
ABDELMUHSIN	E7	17.00	17.80	75/19
ABDELMUHSIN	E24	17.00	16.65	50/19
JOHNSON	E19	24.50	23.06	70/19
JOHNSON	E25	24.50	23.37	70/19

ϕ/H désigne le rapport du diamètre de la trousse oedométrique sur l'épaisseur de l'échantillon de sol

La comparaison des résultats de prédiction, du pourcentage de gonflement, aux valeurs mesurées de celui-ci (tableau 4.5) montre que les résultats des modèles de prédiction sont indépendants du ϕ/H . Les résultats de prédiction, par différentes méthodes, devrait être comparés aux mesures expérimentales selon une procédure standard, de sorte à pouvoir comparer ces différentes méthodes de prédiction. Une étude de comparaison, et de standardisation, des divers procédures expérimentales de mesure du potentiel de gonflement indiquerait quelle procédure pouvant être considérée comme référence. Les résultats des prédictions seront comparés aux résultats expérimentaux de la procédure de référence.

4.2.2 Pression de Gonflement.

Les remarques et interprétations ayant été portées sur les prédictions du pourcentage de gonflement sont valables pour les

trois modèles recensés pour la prédiction de la pression de gonflement. Dans la littérature, la pression de gonflement des sols est étudiée de manière restreinte à cause de la complexité du mécanisme de la pression de gonflement. Le développement des connaissances sur la pression de gonflement est remarquablement limité. Un grand nombre d'études expérimentales (CHEN, 1988) montre que la pression de gonflement des sols expansifs est indépendante de la teneur initiale en eau, du degré de saturation, et de l'épaisseur de couche. Dans la littérature, plusieurs avis concernant la nature de la pression de gonflement, son amplitude, et ses caractéristiques existent. Certains chercheurs considèrent la pression de gonflement comme mécanisme osmotique. D'autres considèrent le gonflement d'un point de vue thermodynamique. Les études sur la pression de gonflement sont peu nombreuses par rapport à celles sur le pourcentage de gonflement.

Les paramètres physiques, et mécaniques considérés dans les modèles de prédiction de la pression de gonflement, sont mentionnés sur le tableau 3.1.

La figure (4.9) montre les relations entre les résultats de prédiction de la pression de gonflement par le modèle de KOMORNIK et DAVID (1969), et par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN (1971), et les mesures expérimentales. Les points représentant les résultats de prédiction de la pression de gonflement semblent "aléatoires". L'aspect peu harmonique des résultats peut être dû à la non considération de certains paramètres par les modèles étudiés tels que la limite de retrait, et la texture interne du sol. Dans les sols secs, ou presque secs, comme le cas des sols de la région d'IN-AMENAS, la succion capillaire est le plus important paramètre affectant la pression de gonflement. La succion capillaire est directement liée à la teneur en eau du sol. La teneur en eau peut, par conséquent, représenter la succion capillaire.

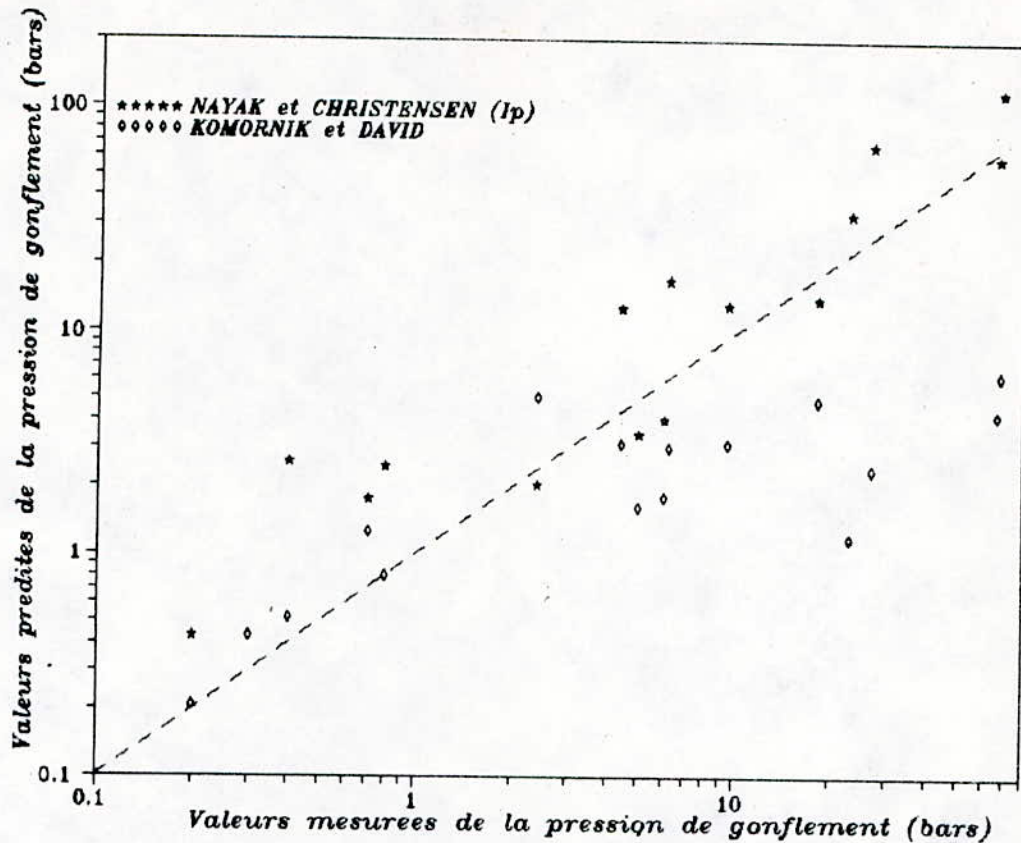


Figure 4.9: Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédiction des Pressions de Gonflement Selon NAYAK et CHRISTENSEN, et Selon KOMORNIK et DAVID.

Les résultats de prédiction de la pression de gonflement relatifs aux modèles de NAYAK et CHRISTENSEN sont homothétiques, comme pour le cas des résultats de prédiction du pourcentage de gonflement. Les trois courbes représentatives des résultats des modèles de NAYAK et CHRISTENSEN (I_p , I_r , et ω_l) présentent de légères différences les unes par rapport aux autres, c'est pourquoi, le modèle tenant compte de l'indice de plasticité est considéré comme le suggèrent NAYAK et CHRISTENSEN.

NAYAK et CHRISTENSEN affirment que les trois paramètres (I_p , I_r et ω_l) sont introduits pour caractériser le rapport de la surface spécifique sur la valence des cations échangeables. La limite de

liquidité caractérise, entre autres, la viscosité de la suspension argileuse, et l'état d'enchevêtrement des particules. La plasticité d'un sol argileux est fonction, de la surface spécifique, de la nature des ions échangeables, de l'épaisseur de la couche d'eau liée, et de la forme des particules. L'indice de retrait du sol dépend, entre autres, de l'architecture du squelette solide, et de la finesse des particules. Les résultats des prédictions de la pression de gonflement, par les trois méthodes de NAYAK et CHRISTENSEN présentent d'importantes variations d'un échantillon à un autre. Une justification de ces variations ne semble pas être évidente. Cependant, dans l'intervalle [2, 5] bars, de la pression mesurée, les résultats de prédiction par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN, faisant intervenir l'indice de plasticité sont satisfaisants. L'aspect perturbé de cette courbe indique que d'autres paramètres sont ignorés par le modèle. NAYAK et CHRISTENSEN indiquent que la pression de gonflement est plus corrélée à l'indice de plasticité qu'à l'indice de retrait, ou à la limite de liquidité. Une étude comparative des trois techniques de prédictions n'a pas été rapportée par les chercheurs. Une telle étude peut mettre en évidence les aspects communs et particuliers à chacune d'elles.

Dans l'étude de NAYAK et CHRISTENSEN, les pressions de gonflement mesurées appartiennent à l'intervalle [0.7 bars, 2 bars], ce qui sous-entend un risque d'inadéquation des modèles à l'extérieur de cet intervalle. Une pression de gonflement inférieure à 2 bars montre que le sol est faiblement à moyennement expansifs. Par conséquent, le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN serait inapplicable aux sols à fortes pressions de gonflement.

Pour les résultats de prédiction obtenus par utilisation de l'indice de retrait, les mêmes remarques peuvent être faites, sauf que l'intervalle dans lequel les prédictions approchent les mesures est [2, 3] bars. Dans l'intervalle [2, 3] bars, le modèle en question est applicable du fait que les points représentatifs de ses résultats de prédiction sont proches de la première

bissectrice. Pour le cas de l'échantillon (7), la valeur prédite de la pression de gonflement est exactement égale à celle mesurée. Ce résultat est, probablement, une simple coïncidence, car une combinaison particulière des valeurs de l'indice de retrait, de la teneur initiale en eau, et de la teneur en argile peut donner ce résultat (valeur prédite égale à la valeur mesurée). Une étude inverse de données, dans le but de chercher les types de sols auxquels le modèle est adaptable, est possible. L'analyse consiste à considérer un modèle, et de chercher les domaines pour lesquels les résultats de prédiction sont comparables aux mesures expérimentales en faisant varier chaque paramètre figurant dans l'expression analytique du modèle. L'intersection de tous les domaines de variation des paramètres, définira un domaine de type de sols. Ce domaine peut coïncider avec un ou plusieurs sols naturels. L'analyse peut se faire lorsque des groupes de paramètres sont considérés.

Le modèle faisant intervenir l'indice de plasticité est celui devant prévoir le mieux la pression de gonflement (NAYAK et CHRISTENSEN, 1971). Dans l'intervalle [2, 5] bars, les prédictions sont étroitement proches des mesures expérimentales. Celles-ci, sont meilleures que les résultats relatifs aux méthodes faisant intervenir l'indice de retrait ou la limite de liquidité. A l'extérieur de l'intervalle en question, les corrélations, entre les prédictions et les mesures expérimentales, sont faibles. L'éloignement des résultats de prédiction de la première bissectrice, à l'extérieur de l'intervalle [2, 5] bars, est plus affecté par le carré du rapport de la teneur en argile sur la teneur en eau plutôt que des paramètres I_p , I_r et ω . Ceci est appuyé par l'expression analytique des modèles de NAYAK et CHRISTENSEN. Même dans l'intervalle de validité des modèles, le rapport $(C/\omega)^2$ affecte considérablement le résultat de prédiction à cause des faibles valeurs de la teneur initiale en eau, et du degré du rapport (C/ω) . Les modèles en question prédisent, donc, convenablement la pression de gonflement dans l'intervalle [2, 5] bars.

La méthode de KOMORNIK et DAVID (1969), comme le montre la figure (4.9), prédit mal la pression de gonflement. L'aspect de distribution des points de la courbe de KOMORNIK et DAVID autour de la première bissectrice ne permet pas de limiter un intervalle dans lequel la prédiction est satisfaisante. Cependant, le nuage des points tend à être parallèle à la première bissectrice.

Les résultats du modèle de KOMORNIK et DAVID sont peu satisfaisants même dans l'étude originale des auteurs. La cohérence des résultats est moins probable pour les sols d'IN-AMENAS. La différence majeure entre les deux catégories de sols (sols de la Palestine, et sols d'IN-AMENAS) est notée au niveau de la teneur initiale en eau. Des différences sur d'autres paramètres non mentionnés par les auteurs, tels que les limites d'ATTERBERG, et la teneur en argile, sont possibles. De manière générale, les avis s'entendent sur l'éventuelle dépendance entre, d'une part, la pression de gonflement, et d'autre part, la densité sèche et la teneur initiale en eau. Le modèle de KOMORNIK et DAVID tient compte de la teneur initiale en eau, et de la densité sèche. La considération de la teneur initiale en eau comme référence est impossible, car c'est une grandeur variable dans le temps. La teneur "initiale" en eau peut être mesurée en été, ou en hiver. En considérant la variation de la "teneur initiale en eau", de meilleurs résultats de prédiction sont possibles. La teneur en eau de référence peut être la limite de retrait. L'élargissement de l'intervalle de confiance des prévisions sera possible si une courbe moyenne passant par le nuage des points est considérée. Dans ce cas, le nombre d'observations doit être suffisamment augmenté.

4.3 ANALYSE REGRESSIVE des METHODES de PREDICTION du POTENTIEL de GONFLEMENT

4.3.1 INTRODUCTION.

Dans le but d'ajuster les résultats des prédictions aux mesures expérimentales du potentiel de gonflement des sols étudiés (Douze échantillons de sol de la région d'IN-AMENAS, et quatre échantillons de sol du golf de Palestine), une étude d'optimisation des coefficients de différents modèles est établie. L'analyse régressive, des coefficients figurant dans les modèles, de prédiction tient compte des caractéristiques physiques et mécaniques de chaque échantillon de sol, ainsi que des résultats d'essais de gonflement. Les coefficients optimisés sont ceux apparaissant dans les expressions des modèles empiriques. Les méthodes empiriques sont adaptables à divers types de sols. Les résultats de prédiction par les méthodes empiriques sont comparables aux mesures expérimentales lorsque les sols étudiés sont similaires aux sols pour lesquels les modèles ont été étalonnés. L'identité entre les deux groupes de sols englobe la composition minéralogique, et les caractéristiques physiques et mécaniques du sol. Une comparaison entre les sols étudiés et les sols originaux, de chaque modèle empirique, est nécessaire pour l'interprétation des résultats. Une analyse régressive peut améliorer les résultats de prédiction dans un intervalle auquel appartiennent les caractéristiques physiques du sol considéré.

Dans l'analyse régressive, les expressions des modèles ont été conservés. Les coefficients apparaissant dans ces modèles ont été optimisés compte tenu des caractéristiques physiques des sols étudiés. Les formes des modèles de prédiction ont été conservées dans le but de pouvoir comparer les deux expressions de prédiction (avant et après régression). La rétention d'une même forme d'un modèle de prédiction aide à identifier l'effet de chaque paramètre. Ainsi, un problème compliqué est décomposé en d'autres plus élémentaires. La conservation de la forme d'un modèle de prédiction

peut limiter l'amélioration de la corrélation entre les observations et les résultats de prédiction. Les gonflements observés, et les caractéristiques physiques d'un sol expansif peuvent être mieux reliés sous une autre forme du modèle. L'analyse régressive, avec conservation de la forme d'un modèle de prévision, peut rendre ce dernier plus inadéquat. En particulier lorsque

- les résultats des mesures expérimentales sont, parfois, incompatibles dans leur ensemble,
- des paramètres, affectant sensiblement la grandeur prédite, sont ignorés.

Le jugement de la fiabilité d'un modèle, après régression, est difficile dans le cas des expressions non linéaires. Dans les expressions non linéaires, et pour un même ensemble d'observations, plusieurs solutions peuvent exister. Mathématiquement, la meilleure solution est celle pour laquelle la somme des carrés des différences, entre les mesures expérimentales et les valeurs prédites, est minimale. Cependant, la meilleure solution mathématique peut être différente de la meilleure solution du point de vue physique. La meilleure solution mathématique peut indiquer que le gonflement est inversement proportionnel à certains paramètres physiques du sol (indice de plasticité, teneur en argile,), alors que physiquement c'est le contraire qui est vrai. Cette contradiction entre le sens physique du problème, et la philosophie de l'optimisation est constatée sur presque tous les modèles étudiés, et particulièrement sur les modèles de SEED et al. (1962), les modèles de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973), et le modèle de SCHNEIDER et POOR (1974).

4.3.2 Interprétation des Résultats Après Régression.

Les résultats des prédictions des potentiels de gonflement des seize échantillons de sol considérés, ainsi que les expressions des modèles empiriques, après régression, sont rapportées sur le tableau 4.6. Le tableau 4.6 montre que les expressions des modèles après régressions diffèrent, de manière remarquable, des

expressions originales. Dans l'analyse régressive des modèles tenant compte de la teneur initiale en eau, cette dernière est remplacée par la limite de retrait si la teneur initiale en eau est inférieure à la limite de retrait. Le remplacement de la teneur initiale en eau par la limite de retrait limite l'augmentation du potentiel de gonflement prédit lorsque la teneur initiale en eau tend vers zéro.

4.3.2.1 Pourcentage de Gonflement.

Les figures (4.10) et (4.11) montrent les relations entre les pourcentages de gonflement prévus, après optimisation, et les pourcentages de gonflement mesurés. La courbe en pointillés représente l'ensemble des points pour lesquels le pourcentage de gonflement prévu est égal au pourcentage de gonflement mesuré. Les figures (4.10) et (4.11) montrent que les résultats des prédictions par toutes les méthodes considérées sont situés de part et d'autre de la première bissectrice. Quelques points sont situés au voisinage de la première bissectrice. Cette constatation traduit une amélioration des résultats des prédictions relativement aux résultats avant régression.

Après régression, le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN (1971) tient compte de la teneur initiale en eau, si celle-ci est supérieure à la limite de retrait. Si la teneur initiale en eau est inférieure à la limite de retrait, cette dernière est considérée au lieu de la teneur initiale en eau. Dans l'analyse régressive des modèles non linéaires, tels que le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN, plusieurs solutions sont possibles. Cependant, la meilleure solution mathématique peut être refusée du point de vue physique. Parmi toutes les solutions possibles, celle optimale, et satisfaisant les conditions physiques du phénomène de gonflement du sol, est prise en compte. Le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN, pour la prédiction du pourcentage de gonflement, présente des résultats presque identiques lorsque les teneurs en eau "initiales" sont comparables.

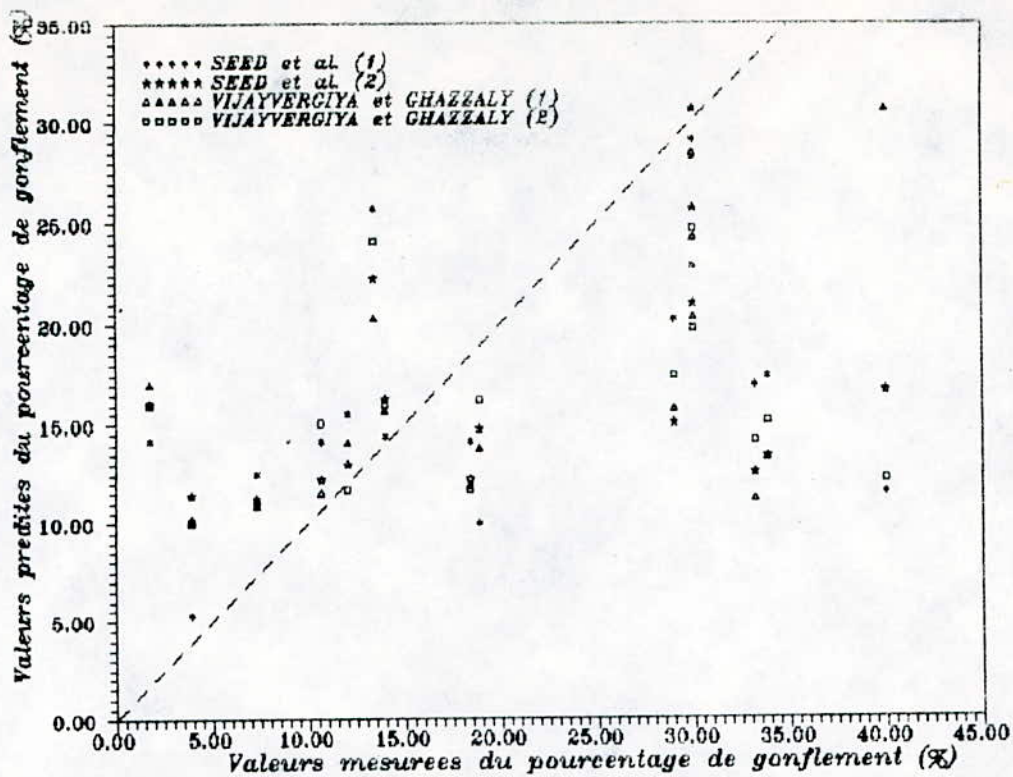


Figure 4.10: Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédiction des Pourcentages de Gonflement, Après Régressions, Selon les Auteurs Cités Dans la Légende.

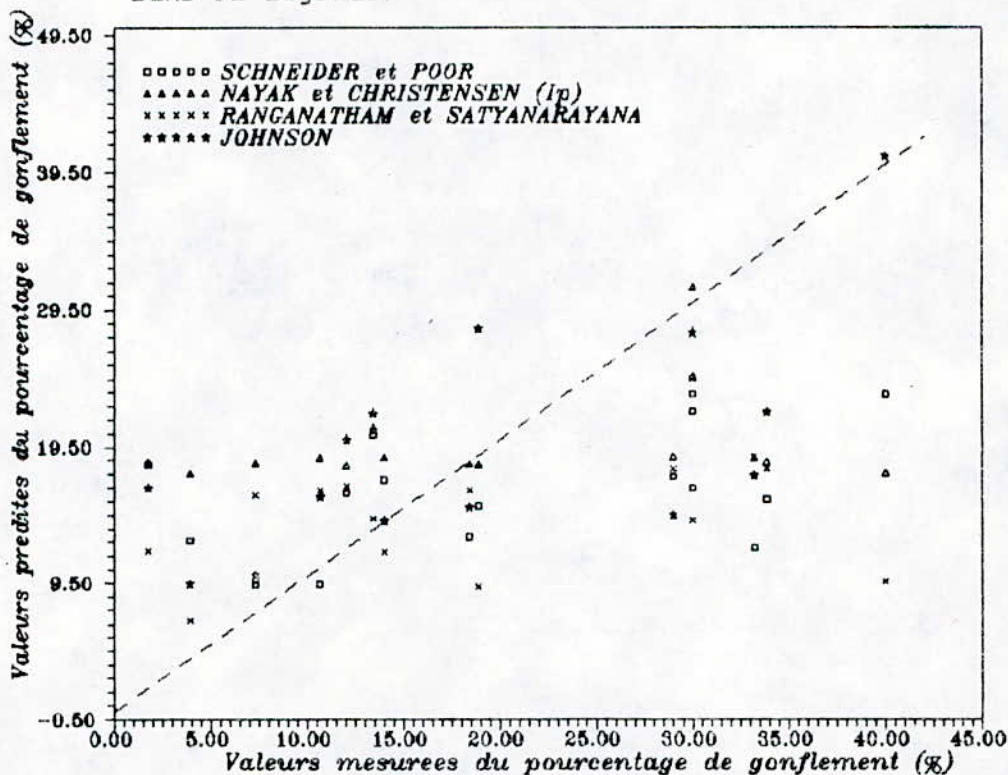


Figure 4.11: Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédiction des Pourcentages de Gonflement, Après Régressions, Selon les Auteurs Cite Dans la Légende.

La comparaison des résultats des échantillons (2) et (5), (tableau 4.6), montre que pour une même teneur initiale en eau, le pourcentage de gonflement prévu est sensiblement le même. La même constatation est faite pour les échantillons (8) et (14). Cependant, l'effet des autres paramètres, intervenant dans l'expression du modèle, peut être dominant. En effet, bien que la teneur initiale en eau de l'échantillon (9) est plus faible que celle de l'échantillon (10), le pourcentage de gonflement prévu pour l'échantillon (9) est, sensiblement, le même que celui prévu pour l'échantillon (10). La constatation précédente montre que, dans le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN, la teneur initiale en eau est un facteur dominant mais pouvant être contre-carré si d'autres paramètres, apparaissant dans ce modèle, sont combinés de manière appropriée (faible teneur en argile et/ou important indice de plasticité).

NAYAK et CHRISTENSEN (1971) affirment que dans leur modèle, de prédiction du pourcentage de gonflement et de la pression de gonflement, l'indice de plasticité caractérise le rapport de la surface spécifique sur la valence du cation adsorbé. Cependant, une autre grandeur physique, ou mécanique d'un sol, telle que la cohésion par exemple, peut caractériser sa surface spécifique. Le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN sur-estime le pourcentage de gonflement pour les échantillons de sol faiblement à moyennement expansifs (pourcentage de gonflement mesuré variant de 2 à 11). Pour les sols à pourcentage de gonflement supérieur à 11, les résultats de prédiction par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN (1971) sont faibles par rapport aux mesures expérimentales.

Les résultats des modèles de NAYAK et CHRISTENSEN faisant intervenir la limite de liquidité, ou l'indice de retrait peuvent être déduits par homothétie des résultats des trois expressions. La considération de la méthode faisant intervenir l'indice de plasticité (I_p) est indiquée pour ses meilleurs résultats relativement aux deux autres paramètres (I_r , et w_l). Cependant, la détermination des indices de plasticité, et de retrait requiert la

détermination de la limite de liquidité. La réciproque est fautive. Le mode opératoire de détermination de la limite de liquidité est simple, relativement aux modes opératoires de détermination de l'indice de plasticité, ou l'indice de retrait. Les erreurs expérimentales éventuelles, dans la détermination de la limite de liquidité, sont moins probables que celles relatives à la détermination de l'indice de plasticité, ou de l'indice de retrait. Souvent, plus le mode opératoire, de détermination d'un paramètre, est simple, plus les erreurs expérimentales sont réduites. Un modèle requiert, généralement, une bonne estimation de ses paramètres.

Les résultats de prédiction sont, par conséquent, fonction des mesures expérimentales des paramètres. Aussi, les valeurs des mesures expérimentales du pourcentage de gonflement ont été considérées dans l'analyse régressive, pour l'élaboration des expressions des modèles optimisés. Si les pourcentages de gonflement ne sont pas correctement mesurés, les abscisses des points considérés seraient, théoriquement, situés, plus ou moins, vers la gauche ou vers la droite. De même, les valeurs des coefficients optimisés seraient, théoriquement, différentes de celles obtenues, une meilleure corrélation entre les résultats de prédiction et les mesures expérimentales est, alors, possible. La consultation de résultats d'essais, pour la réalisation d'ouvrages à IN-AMENAS (piste d'aérodrome, hôpital civil, siège des postes et télécommunication) indique que les mesures relatives aux échantillons 1, 2, 3, 4 et 9 sont faibles relativement aux observations courantes. La chute, relative, du résultat de la prédiction du pourcentage de gonflement au droit des échantillons 9, et 12 ne semble pas être explicable (figure 4.11).

Les mesures expérimentales, par le biais des essais courants de laboratoire, doivent être examinées avec beaucoup d'attention et de réflexion. Dans la plus part des cas, l'interprétation des résultats est directement liée aux valeurs de ces derniers. En géotechnique, l'exploitation des résultats d'essais constitue

l'essentiel, et l'étape la plus difficile dans l'établissement des conclusions.

La moyenne des nombreuses mesures expérimentales, d'une même grandeur, peut approcher la valeur exacte de cette grandeur. Dans le cas des sols expansifs, les mesures des pourcentages, et des pressions de gonflement sont souvent différentes des valeurs observées sur site. Dans la pratique, plusieurs procédures de mesure du gonflement d'un sol expansif existent. Les résultats des mesures expérimentales diffèrent d'une procédure à une autre. La dispersion des résultats des procédures ne constitue pas, en elle-même, le problème principal. Les résultats des divers modèles peuvent être comparés à un résultat d'observation, ou à un intervalle de confiance donné. Le problème de fond est le choix de la (les) procédure(s), de mesure du pourcentage de gonflement, ou de la pression de gonflement. Le paramètre à mesurer peut être approché par le biais d'un mode opératoire, cependant, la valeur réelle de ce paramètre est inconnue avec exactitude pour pouvoir juger la procédure d'essai. L'expérience de l'opérateur, et la compatibilité de l'essai sont souvent importantes pour le jugement de la fiabilité d'un résultat.

Le modèle de JOHNSON (1978) (figure 4.10) surestime, pour la majorité des échantillons de sol considérés, le pourcentage de gonflement. La méthode originale de JOHNSON se présente en deux expressions différentes selon que l'indice de plasticité est supérieur ou inférieur à 40%. L'examen des deux expressions de JOHNSON (l'une pour $I_p < 40\%$ et l'autre pour $I_p \geq 40\%$), montre une continuité des expressions des deux modèles de prévision au point $I_p = 40\%$. Au voisinage de $I_p = 40\%$, l'extrapolation de la courbe représentative de l'une des deux expressions se trouve, approximativement, sur le prolongement de la courbe représentative de l'autre courbe.

Le modèle de JOHNSON peut être mieux ajusté si le nombre d'observations était plus grand. Les échantillons de sol devront

avoir des indices de plasticité convenablement distribués autour de la valeur 40%. L'aspect perturbé des résultats de prédiction du pourcentage de gonflement, par la méthode de JOHNSON est, probablement, lié au fait que l'indice de plasticité varie considérablement d'un échantillon à un autres (15% à 58%). Après régression, l'expression de JOHNSON, pour $I_p < 40\%$, montre que le pourcentage de gonflement est inversement proportionnel à l'indice de plasticité, alors que l'expérience montre que c'est le contraire qui est vrai. Le coefficient de pondération, relatif à l'indice de plasticité, est fonction des valeurs expérimentales de l'indice de plasticité, et du pourcentage de gonflement. Si toutes les mesures expérimentales des pourcentages de gonflement sont proportionnelles aux mesures expérimentales de l'indice de plasticité, l'analyse régressive doit indiquer un coefficient de proportionnalité entre ces deux grandeurs. Le coefficient de pondération de l'indice de plasticité est alors positif, supérieur à un. L'indice de plasticité est fonction d'autres paramètres physiques du sol, tels que la teneur en argile, la composition minéralogique du sol, la limite de liquidité, et la limite de plasticité. La décomposition de l'indice de plasticité, en des paramètres plus élémentaires, peut montrer lequel des paramètres affecte le plus les résultats de prédiction du pourcentage de gonflement.

Les coefficients de pondération contiennent beaucoup d'informations sur des grandeurs du sol. Ces grandeurs peuvent être non quantifiables, non identifiables, ou inconnues. Un coefficient de pondération représente un ensemble de grandeurs couplées. La décomposition de cet ensemble de grandeurs composées constitue l'aspect le plus compliqué de l'étude des résultats de l'analyse régressive. Une analyse régressive d'un ensemble de paramètres requiert, impérativement, des mesures "exactes" de ces paramètres. Dans l'expression originale du modèle de JOHNSON (1978), la teneur initiale en eau apparaît deux fois. Les coefficients de pondération de la teneur initiale en eau sont l'un positif, et l'autre négatif. Cependant, l'expérience montre que le pourcentage de gonflement et la teneur initiale en eau sont inversement proportionnels l'un à

l'autre. Théoriquement, le coefficient de pondération de la teneur initiale en eau (ou l'exposant attribué à celle-ci) devrait être négatif, de sorte que le pourcentage de gonflement décroît lorsque la teneur initiale en eau augmente. La constatation précédente met l'accent sur l'importance de l'analyse physique du problème. Les solutions mathématiques sont parfois trompeuses.

Les résultats de prédiction du pourcentage de gonflement, par la méthode (2) de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973), sont distribués de part et d'autre de la première bissectrice, cependant, ils présentent d'importantes variations par rapport aux mesures expérimentales. L'examen de l'expression (2) des auteurs, après régression, montre que le pourcentage de gonflement prédit est très étroitement lié à l'état de densité du sol. La valeur de la limite de liquidité n'affecte, presque pas, les résultats des prédictions. Physiquement, la proportionnalité entre le pourcentage de gonflement d'un sol expansif, et son poids volumique sec, est plus facilement compréhensible que la proportionnalité entre le pourcentage de gonflement, et la limite de liquidité. En outre, le poids volumique sec dépend, entre autres, de la teneur en argile du sol, et de la granulométrie.

Contrairement aux résultats de prédiction, du pourcentage de gonflement, par la méthode (2) de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY, les résultats de prédiction, par la méthode (1), sont pratiquement constants. L'examen des méthodes de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (avant et après régression) montre que dans les expressions originales des auteurs, le coefficient de pondération relatif à la limite de liquidité est positif, dans les expressions après régression, le même coefficient est négatif. La valeur positive, du coefficient relatif à la limite de liquidité dans les expressions originales des auteurs, indique que le pourcentage de gonflement du sol expansif est proportionnel à la limite de liquidité. Cependant, dans les nouvelles expressions, le pourcentage de gonflement est inversement proportionnel à la limite de liquidité.

La relation entre le pourcentage de gonflement et la limite de liquidité peut être analysée de deux vues différentes. La limite de liquidité est d'autant plus élevée que les liaisons entre les particules, constituant l'échantillon de sol, sont fortes. Dans l'essai de détermination de la limite de liquidité, à l'appareil de CASAGRANDE, l'énergie transmise à l'échantillon de sol, à une teneur en eau donnée, sert à "rompre" les liaisons entre les particules, et à arranger les grains dans un état plus dense. Lorsqu'un sol gonflant est mis en contact de l'eau, les liaisons (inter-particulaires, et/ou inter-follières) sont, à une certaine teneur en eau, dans leur grande majorité rompues. La rupture des liaisons sous-entend une faible limite de liquidité. Le raisonnement précédant indique que, pour un sol gonflant, le pourcentage de gonflement est inversement proportionnel à la limite de liquidité. Cependant, d'autres mécanismes, tels que la cohésion du sol, peuvent intervenir. Si le sol est cohésif, les particules sont fortement liées les unes aux autres, la fermeture de la rainure nécessite une grande énergie. La limite de liquidité d'un sol est, par conséquent, d'autant plus grande que celui-ci est cohésif. Les mécanismes décrits précédemment sont suffisants pour comprendre l'aspect apparent du phénomène, mais ne sont pas forcément nécessaires.

La figure (4.11) montre que les résultats de prédiction du pourcentage de gonflement par la méthode de SCHNEIDER et POOR (1974) sont pratiquement stationnaires par rapport aux mesures expérimentales. Le résultat de l'optimisation des coefficients apparaissant dans ce modèle est une translation, en bloc, de la courbe avant régression. Les pourcentages de gonflement prévus par le modèle de SCHNEIDER et POOR (1974), des échantillons 5 et 6 sont, respectivement, proches des mesures expérimentales. Les mêmes remarques rapportées précédemment, sur les valeurs des coefficients de pondération, seraient valables pour le cas du modèle de SCHNEIDER et POOR. La valeur négative du coefficient de pondération du rapport (I_p/ω_c) indique que le pourcentage de gonflement est proportionnel à la teneur initiale en eau, et est inversement

proportionnel à l'indice de plasticité. Le signe, et la valeur des coefficients de pondération sont affectés par la variabilité de la valeur de la teneur en eau corrigée (w_c). La teneur, corrigée, en eau (w_c) est, tantôt égale à la teneur initiale en eau, tantôt égale à la limite de retrait. Une valeur convenable du coefficient de pondération est obtenue si:

- les résultats de mesures des pourcentages de gonflement sont, non seulement inversement proportionnels à la teneur initiale en eau, mais aussi inversement proportionnels à la limite de retrait,
- toutes les valeurs des teneurs initiales en eau sont soit supérieures, soit inférieures aux valeurs des limites de retrait.

Si l'une des deux conditions précédentes est absente, la compatibilité du coefficient de pondération de la grandeur w_c avec le sens physique du mécanisme de gonflement, risque de faire défaut.

Les résultats de prédiction du pourcentage de gonflement, par la méthode de RANGANATHAM et SATYANARAYANA (figure 4.11), présentent d'importantes variations d'un échantillon de sol à un autre. Les méthodes basées sur la teneur en argile risquent d'être imprécises du fait que la teneur en argile des sols expansifs est entachée de beaucoup d'erreurs de détermination. Le mode opératoire, de détermination de la composition centésimale dimensionnelle des particules constituant un sol, nécessite un contact permanent avec l'eau, que ce soit en phase du tamisage, ou de sédimentation (lavage, imbibition, décantation, ...). La nature du sol d'IN-AMENAS est telle qu'un tamisage par voie humide est nécessaire. Le matériau, mis en contact de l'eau gonfle inévitablement. Les résultats de l'analyse granulométrique sont, par conséquent, faussés. La teneur en argile réelle devrait être plus grande que celle déterminée par ces procédés (classiques) d'analyse granulométrique. L'erreur entre la teneur en argile apparente, déterminée par analyse granulométrique classique, et la vraie teneur en argile est variable selon le pourcentage de

gonflement du matériau. Les résultats de prédiction obtenus par des modèles, faisant intervenir la teneur en argile, devront, par conséquent, être plus grands. De meilleures corrélations entre les résultats de prédiction, et les résultats expérimentaux sont plus probables.

L'analyse régressive attribue une faible valeur du coefficient de pondération au paramètre du sol présentant les plus grandes variations d'un échantillon à un autre. Lorsqu'un paramètre varie considérablement, d'un échantillon de sol à un autre, la corrélation, entre les données d'un modèle, et ses résultats de prédiction, est faible. La considération précédente est d'autant vraie que le nombre de paramètres requis par un modèle de prédiction est faible. Ainsi, une meilleure optimisation des modèles étudiés est possible si le nombre d'observations (essais mécaniques et d'identification) était suffisamment grand, de l'ordre d'une centaine par exemple. Dans ce cas, les observations extrêmes sont éliminées de sorte à ne tenir compte que de celles physiquement cohérentes, et compatibles avec les grandeurs observées.

Les figures 4.10, et 4.11 montrent que les résultats des prédictions obtenus par les modèles de SCHNEIDER et POOR, de JOHNSON, de VIJAYVERGIYA et GHAZZALY, et de SEED et al. (méthode 2) sont constants par rapport aux observations, dans l'intervalle [18 %, 28 %]. La méthode (2) de SEED et al. fait intervenir un seul paramètre (indice de plasticité). Un seul paramètre est, généralement, insuffisant pour prédire, convenablement, le pourcentage de gonflement d'un sol expansif. D'autre part, Après analyse régressive du modèle (2) de SEED et al., l'exposant correspondant à l'indice de plasticité est négatif, ce qui sous-entend, mathématiquement, que le pourcentage de gonflement est inversement proportionnel à l'indice de plasticité. L'expérience montre que le pourcentage de gonflement augmente avec l'indice de plasticité. Les résultats de prédiction, des méthodes faisant intervenir un nombre réduit de paramètres du sol, montrent que

celles-ci s'adaptent mal aux sols dont les caractéristiques physiques, et mécaniques varient considérablement d'un point d'échantillonnage à un autre point voisin (cas des sols d'IN-AMENAS). Les modèles faisant intervenir plusieurs paramètres du sol sont, parfois, moins fidèles que les précédents. La simplicité des modèles de prédiction a été discutée au chapitre 3. Les résultats de prédiction, par les méthodes empiriques, peuvent être satisfaisants pour certaines classes de sols, mais moins satisfaisantes pour d'autres classes.

L'examen des méthodes de prédiction du pourcentage de gonflement montre qu'en général, de meilleurs résultats de prédiction que ceux de JOHNSON, et de SEED et al. (1) sont peu probables.

L'amélioration des résultats de prédiction est peu probable pour les raisons suivantes:

- les résultats des mesures expérimentales sont très dispersés,
- le nombre d'observations est faible.

- la procédure expérimentale de mesure des potentiels de gonflement est, parfois, différente des procédures adoptées dans les divers modèles. Les modèles de prédiction du pourcentage de gonflement, pour lesquels le pourcentage de gonflement est déterminé par une procédure, quelconque, ont été adaptés de sorte qu'ils soient compatibles avec la procédure A.S.T.M D45-46-86, méthode A. (la profondeur réelle d'échantillonnage est remplacée par une profondeur équivalente correspondant à la charge du piston, et l'épaisseur de couche est remplacée par l'épaisseur de l'échantillon de sol).

4.3.2.2 Pression de Gonflement.

Les modèles de prédiction de la pression de gonflement étudiés sont au nombre de deux (figure 4.12), la méthode de KOMORNIK et DAVID (1969), et la méthode de NAYAK et CHRISTENSEN (1971). Le nuage des

points représentant les résultats de prédiction, de la pression de gonflement, par le méthode de KOMORNIK et DAVID (1969) suit, remarquablement la direction de la première bissectrice dans tout l'intervalle des valeurs mesurées de la pression de gonflement.

L'examen des deux ensembles de coefficients de pondération (modèle original, et modèle optimisé) montre que les coefficients relatifs à la teneur initiale en eau, et à la limite de liquidité sont, sensiblement, restés les mêmes, tandis que le coefficient relatif au poids volumique sec a, amplement, varié. D'un point de vue physique, et macroscopique, un poids volumique caractérise l'état de compacité du matériau.

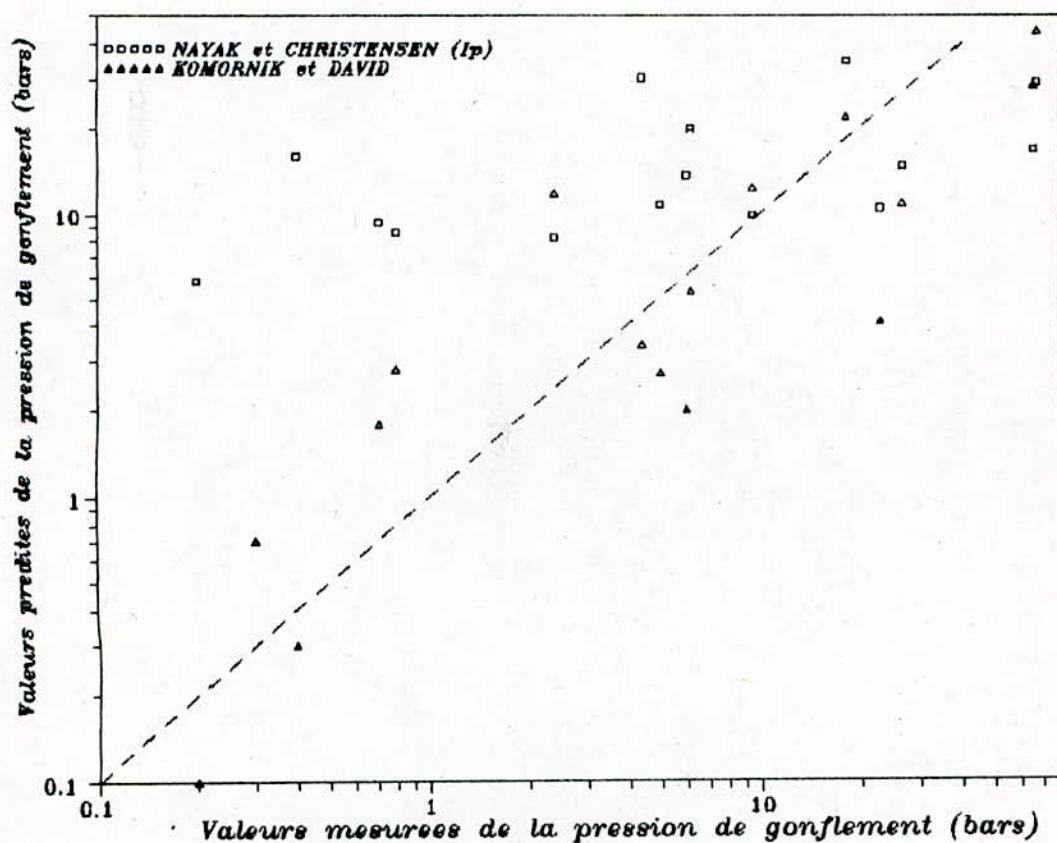


Figure 4.12: Représentation Graphique des Mesures Expérimentales, et des Résultats de Prédiction des Pressions de Gonflement, Après Régressions, Selon les Auteurs Cite Dans la Légende.

Les résultats de prédiction de la pression de gonflement par le modèle de KOMORNIK et DAVID (1969), sont, dans l'ensemble satisfaisants. Ce modèle peut, par conséquent, être utilisé pour la prédiction de la pression de gonflement des sols d'IN-AMENAS. Les pressions de gonflement mesurées par les auteurs KOMORNIK et DAVID, sur les sols de Palestine, sont, dans plus de 50% des cas, inférieures à un bar, alors que les sols d'IN-AMENAS présentent des pressions de gonflement beaucoup plus élevées. Dans le domaine de la construction, lorsque la pression de gonflement d'un sol expansif, est inférieure à un bar, les dommages causés aux structures ne sont pas importants. Les structures souples s'adaptent au gonflement, celles rigides, et/ou lourdes, contrecarrent le gonflement. Les pressions de gonflement supérieures à un bar sont à craindre. La prédiction de la pression de gonflement est plus importante pour le cas des sols à forte pression de gonflement c'est celle-ci qui cause les plus grands dommages aux structures. Le modèle de KOMORNIK et DAVID serait mieux ajusté aux sols d'IN-AMENAS si une bonne base de données était disponible. En matière de statistiques, plus le nombre d'observations est grand, meilleure est l'optimisation du modèle de prédiction. L'intervalle de confiance, et la fiabilité du modèle obtenu sont augmentés par le nombre d'observations.

Le nuage des points représentant les résultats de prédiction, de la pression de gonflement, par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN (1971), est situé relativement loin de la première bissectrice. Pour le cas des sols d'IN-AMENAS, la corrélation entre les mesures expérimentales, et les résultats de prédiction de la pression de gonflement par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN (1971) est faible. La faible corrélation est directement liée à la dispersion des valeurs des mesures expérimentales (0.7 bars, à 68 bars). La dispersion des résultats de prédiction, par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN, indique que :

- le modèle est applicable pour, seulement une partie de l'intervalle de pression de gonflement [0.7, 68] bars,
- un paramètre, dont l'effet, sur la pression de gonflement,

est important, est ignoré, ou

- la forme de l'expression du modèle est peu convenable. La mise en équation des mêmes caractéristiques physiques du sol, sous une autre forme de modèle, peut aboutir à de meilleurs résultats de prédiction.

NAYAK et CHRISTENSEN rapportent que la pression de gonflement d'un sol expansif dépend de la limite de liquidité, de l'indice de plasticité, et/ou de l'indice de retrait (w_l , I_p et/ou I_r), et que chacun de ces trois paramètres est fonction de la surface spécifique du sol. Cependant, KOMORNIK et DAVID affirment, après plusieurs expériences sur les sols expansifs de Palestine, que la corrélation entre l'indice de plasticité et la limite de retrait est très faible. La mise en commun des deux citations est possible, car deux grandeurs peuvent dépendre d'une troisième grandeur sans être corrélées entre elles. La faible corrélation peut être due à la diversité des dépendances entre les deux premières grandeurs et la troisième. Dans chaque mécanisme, plusieurs autres phénomènes peuvent entrer en considération.

Dans l'intervalle [5, 15] bars, les résultats de prédiction, par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN approchent, en moyenne, les mesures expérimentales si une courbe, passant par le nuage des points, est considérée. La pression de gonflement prévue pour l'échantillon 9 est égale à la pression de gonflement mesurée. Les résultats de prévisions, pour les autres échantillons de sol, sont relativement éloignés des valeurs mesurées. Les résultats de prévisions pour les sols artificiels étudiés par NAYAK et CHRISTENSEN, sont comparables aux pressions de gonflement mesurées dans l'intervalle [0.5, 2] bars. Ces résultats de prédiction indiquent que le modèle est inadéquat pour le cas des sols à fortes pressions de gonflement. Le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN est, donc, applicable pour les sols dont les teneurs en argile, teneur initiale en eau, et indice de plasticité appartiennent, respectivement, aux domaines correspondants aux sols originaux étudiés par les auteurs.

Les paramètres physiques, nécessaires pour la prédiction du gonflement d'un sol expansif, doivent être déterminés avec beaucoup d'adresse, car la qualité des résultats de prédiction est fonction, non seulement du modèle considéré, mais aussi, des valeurs des paramètres introduits. Pour les mêmes paramètres du sol, la différence absolue entre les résultats donnés par toutes les méthodes étudiées est inférieure à 30%, alors que pour une même méthode, telle que celle de JOHNSON, une légère variation des valeurs des paramètres d'entrée entraîne une importante variation du résultat de prédiction. De même, les caractéristiques géotechniques d'un sol gonflant sont à déterminer de façon adéquate et compatible avec la tendance de ce sol à l'expansion. L'analyse granulométrique d'un sol gonflant devrait être faite sans contact du matériau avec l'eau. Des précautions identiques sont nécessaires pour la détermination de la limite de liquidité. La mise au point de procédures standards d'identification, propres aux sols gonflants, est souhaitée.

CHAPITRE 5 CONCLUSION GÉNÉRALE

5.1 INTRODUCTION.

L'étude, et la mise en application de quelques méthodes de prédiction du potentiel de gonflement des sols expansifs a permis:

- la compréhension de leurs aspects généraux, de leurs hypothèses, et de leurs étapes de calculs,
- l'explication de certains de leurs résultats de prédiction,
- le recensement de certains avantages, et certains inconvénients des modèles,
- la délimitation de quelques intervalles dans lesquels les modèles sont mieux applicables.

Différents points de vues, et diverses réflexions ont été présentés à travers la diversité des modèles de prédiction. Cependant, la compréhension parfaite de tous les modèles est impossible du fait que cela nécessite, au moins, la reprise intégrale des travaux de recherche de chaque modèle (matériaux, essais, revues bibliographiques, calculs, ...). Ce genre d'étude est long et coûteux. Les travaux des auteurs ont été supposés être menés dans les règles, et les résultats obtenus par ceux-ci sont supposés correctes.

La présente étude a permis d'analyser, sommairement, les quelques modèles présentés, sans pouvoir toucher à tous leurs détails, c'est pourquoi aucun modèle n'a été remis en cause de manière définitive. Cependant, les modèles ayant prédit les grandeurs recherchées de façon satisfaisante ont été retenus après vérification attentive de leurs hypothèses d'application, et de leurs résultats de prédiction.

L'application des modèles retenus pour les sols d'IN-AMENAS est astreinte aux "instructions" et recommandations énoncées, et aux cadres définis. L'application de toute méthode en dehors des

limitations mentionnées risque d'aboutir à des résultats erronés. ,

5.2 RECAPITULATION et RECOMMANDATIONS.

La littérature, spécialisée dans le domaine du gonflement des sols expansifs, rapporte que le gonflement des argiles expansives est fonction de la teneur en argile du sol, des limites d'ATTERBERG, du poids spécifique sec, de la teneur initiale en eau, et de la limite de retrait. Certains de ces paramètres sont principaux, d'autres sont secondaires, ou subordonnés des premiers. L'indice de retrait, par exemple, dépend étroitement de la teneur en argile. La teneur en argile est, alors, indirectement prise en compte, en partie au moins, dans l'indice de retrait.

Dans les modèles de prédiction du pourcentage, ou de la pression de gonflement, la teneur "initiale" en eau est définie de manière peu stricte, car cette teneur en eau peut varier dans le temps. Pour faire référence au moment d'échantillonnage, la nomination "teneur naturelle en eau" est plus correcte. La teneur naturelle en eau est comparée à:

- 1) la teneur naturelle minimale en eau, ou à la limite de retrait, afin de quantifier le gonflement ayant déjà eu lieu dans le temps,
- 2) la teneur naturelle maximale en eau, ou à la limite de liquidité, de sorte à quantifier le gonflement maximal probable.

La limitation du pourcentage de gonflement entre:

- une borne supérieure égale à la plus grande valeur du pourcentage de gonflement ayant été observée dans le monde, et
- une borne inférieure, à partir de laquelle le sol est qualifié d'expansif

a permis de montrer que la teneur en eau minimale est, à quelques exceptions près, comparable à la limite de retrait, et que la teneur en eau maximale est comparable à la limite de liquidité. Cette observation a permis de définir la teneur initiale en eau comme:

- 1) limite de retrait si la teneur initiale en eau du sol est inférieure à la limite de retrait,
- 2) teneur initiale en eau si la teneur initiale en eau est supérieure à la limite de retrait.

Cette définition de la teneur "initiale" en eau permet de borner la valeur prédite du potentiel de gonflement. La teneur en eau minimale peut, par conséquent, être égale à la limite de retrait. Cependant, les deux teneurs en eau (ω_{max} et ω_{min}) restent à vérifier leurs unicités respectives, et la compatibilité de leurs définitions avec la nature des sols gonflants. La notion de teneur en eau naturelle (teneur en eau au moment de l'essai de gonflement) peut être largement développée et exploitée de sorte à mieux maîtriser le comportement du sol expansif dans le temps et selon les conditions du milieu environnant. Si la teneur minimale en eau est égale à la limite de retrait, et si la teneur maximale en eau est égale à la limite de liquidité, l'indice de retrait apparaît comme intervalle de variation des teneurs en eau pour le gonflement des sols expansifs.

Un degré de saturation égal à l'unité n'est pas une limite évidente d'absorption de l'eau de la part du sol. Lorsque le sol atteint un état de stabilité du gonflement, le sol peut être saturé, ou non saturé d'eau. La vérification de la relation entre le gonflement et la saturation est, de ce fait nécessaire.

Le pourcentage des inférieurs à deux microns est une grandeur souvent rencontrée dans les modèles de prédiction du gonflement des sols. Le pourcentage des inférieurs à deux microns est étroitement lié à la surface spécifique du sol, et à son indice de plasticité. La teneur en argile doit être déterminée avec précision car celle-ci affecte, sensiblement, le potentiel de gonflement du sol. La connaissance de la teneur en argile ne donne pas d'informations sur l'allure de la distribution granulométrique du sol. Deux sols à granulométries différentes peuvent avoir le même pourcentage d'éléments inférieurs à deux microns. La prise en compte d'autres

grandeurs liées à la granulométrie, tels que le coefficient de courbure, et le coefficient d'uniformité est indiquée.

Parmi les paramètres mentionnés au début de section, la teneur en argile (ou autre grandeur liée à la granulométrie et donnant plus de détails sur celle-ci), l'indice de retrait, la teneur naturelle en eau, et le poids spécifique sec, sont importants à considérer.

L'état d'arrangement des grains est le seul paramètre n'ayant pas été, directement, pris en compte par les modèles de prédiction du potentiel de gonflement. Si les minéraux argileux sont dirigés selon une orientation privilégiée, leur nature anisotrope sera remarquablement notée lors des essais mécaniques. L'orientation privilégiée des particules peut être mise en évidence par plusieurs mesures des propriétés physiques dans différentes directions (KAARSBERG 1959, PENNER, 1963; WINKELMOLEN, 1972). Les techniques pouvant donner les informations les plus complètes sur l'état d'arrangement des grains englobent la microscopie pétrographique à lumière polarisée, la microscopie électronique, et les analyses de diffraction aux rayons X. L'utilisation du microscope optique permet l'observation de l'orientation générale des minéraux argileux ainsi que leur distribution et leurs arrangements relatifs. La microscopie optique permet, aussi, l'observation de l'arrangement relatif des particules les unes par rapport aux autres, leur distribution dimensionnelle, et leur formes. Une analyse statistique des résultats de diffractions par rayons X peut aboutir à des conclusions intéressantes et satisfaisantes quant à l'état d'arrangement, et l'orientation des particules au sein d'un sol.

Pour l'ensemble des méthodes de prédiction étudiées dans le cadre de ce travail, le choix d'une méthode particulière, s'adaptant aux sols d'IN-AMENAS, n'est pas évident. Cependant, les résultats des méthodes de JOHNSON, et de NAYAK et CHRISTENSEN sont satisfaisants pour certains cas individuels.

5.2.1 Prédiction du Pourcentage de Gonflement.

Le modèle semblant prévoir au mieux le pourcentage de gonflement est celui de NAYAK et CHRISTENSEN (1971), malgré les quelques résultats erronés remarqués. Ce modèle est indiqué pour la prédiction du gonflement des sols d'IN-AMENAS.

Les résultats de prédiction du pourcentage de gonflement par les méthodes de NAYAK et CHRISTENSEN (ω_l , I_p , et I_r) sont, à une constante près, les mêmes. Le modèle le plus indiqué est celui faisant intervenir la limite de liquidité. La limite de liquidité présente l'avantage d'être plus facilement déterminable que l'indice de plasticité, ou l'indice de retrait. Les travaux de KOMORNIK et DAVID (1969) montrent que le pourcentage de gonflement des sols expansifs n'est corrélé ni à l'indice de retrait ni à l'indice de plasticité. La méthode de NAYAK et CHRISTENSEN utilisant la limite de liquidité est restreinte à l'intervalle des gonflements [2% , 11%].

5.2.2 Prédiction de la Pression de Gonflement.

Comme pour le cas du pourcentage de gonflement, les résultats de prédiction de la pression de gonflement par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN sont ceux approchant le mieux les mesures expérimentales. Cependant, le nombre de résultats d'essais introduits dans le cadre de cette étude est faible pour valider un modèle donné. L'expérience montre que la corrélation entre, la pression de gonflement, d'une part, et l'indice de retrait, ou l'indice de plasticité, d'autre part, est faible.

Comme les résultats de prédiction de la pression de gonflement, par la méthode de NAYAK et CHRISTENSEN, sont assez différents des mesures expérimentales au dessous d'une pression de gonflement de 3 bars, la réponse aux besoins de prédiction de la pression de gonflement des sols étudiés peut s'énoncer comme suit:

1) Si le résultat de prédiction de la pression de gonflement est inférieur à 3 bars, il est peu probable que la pression "effective" de gonflement soit élevée. Le problème de construction, sur un site présentant une telle pression de gonflement, peut être solutionné par la mise en place de dispositions constructives classiques (étanchéité, raidissements, ...). La pression de gonflement serait, effectivement, faible, bien que le résultat de prédiction peut être différent de l'observation.

2) Si le résultat de la prédiction est une valeur supérieure à trois bars, la pression de gonflement peut être élevée, comme elle peut être faible. Dans ce cas, la valeur de la pression de gonflement du sol est directement mesurée au laboratoire, ou alors déduite d'un modèle préalablement établi, ou, ajusté pour cette fin. D'ici s'impose la nécessité de faire une étude de recherche d'un modèle qui soit convenable et adéquat aux sols étudiés, au moins pour des pressions de gonflement supérieures à trois bars.

L'analyse régressive de certains modèles a permis d'améliorer leurs résultats de prédiction. Cependant, la compatibilité des expressions des modèles, après régression, avec l'aspect physique du gonflement, n'est pas toujours satisfaite.

Les mesures expérimentales doivent être standardisées, de sorte à comparer les résultats obtenus par différentes procédures. De même, les méthodes de prédiction du potentiel de gonflement doivent être évaluées relativement à une même procédure expérimentale, à défaut de quoi, une comparaison rigoureuse des différents modèles est difficile. La méthode de détermination des pourcentages et des pressions de gonflement influe largement sur l'amplitude de ceux-ci. Les résultats d'essais affectent sensiblement les résultats théoriques de prédiction.

Il est aussi judicieux de déterminer, avec le plus d'exactitude

possible, les paramètres physiques nécessaires pour la prédiction du gonflement d'un sol, que de choisir la meilleure méthode de prédiction. La différence entre les mesures expérimentales et les valeurs prédites par le modèle de NAYAK et CHRISTENSEN est de $\pm 30\%$ dans l'intervalle précédemment défini (2% à 11%). Dans la littérature, l'ordre de grandeur des erreurs est de 33% à 40 %.

BIBLIOGRAPHIE

LEGENDES.

- I. C. E. S International Conference on Expansive Soils.
- A. S. C. E American Society of Civil Engineers.
- I. C. S. M. F. E International Conference on Soil Mechanics
and Foundation Engineering.
- R. C. S. M. F. E Regional Conference on Soil Mechanics and
Foundation Engineering.
- J. S. M. F. D Journal of Soil Mechanics and Foundation
Division.
- Bull. A. A. P. G Bulletin of American Association of Petrol and
Geology.
- A. S. T. M American Society for Testing and Materials.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- ABDELMUHSIN, W DHOWIAN, (1990) "Simplified heave prediction model
for expansive shale." Geot Test Jou GTJODJ, VOL 13 n°4. pp
- AITCHISON, G, D and RICHARDS, B, G, (1969) "The fundamental mechanics
involved in heave and soil moisture movement and the
engineering properties of soil which are important in such
movement." Second International Research and Engineering
Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M Press.
- ANDRES, S ATHANASIU, C and MANEA, S, (1980) "Prediction of expansive
clay behaviour" pp 76-95.

- BOLT, G. H. (1956) "Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays." *Geotechnique* vol 6 N°2 pp 86-93.
- CASAGRANDE, A. (1932) "Researche on the ATTERBERG limits of soils." *Public Roads*, Vol 13, Sections 121-130, pp136.
- CHEN, F. H. (1965) "The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soils." *Engineering effects of moisture changes in soils, concluding proceedings international research and engineering conference on expansive clays soils*, Texas A&M Press.
- CHEN, F. H. (1988) "Foundations on expansive soils." *Elsiever* .
- CHU, T and MOU, C. H. (1973) "Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction tests." *Proceedings of the 3rd international conference on expansive soils*, Haifa, Israel.
- CRONEY, D and COLEMAN, J. D. (1954) "Soil structure in relation to soil suction (Pf)." *Journal of Soil Sci*, Vol 5 N°75. *
- Peck, R Hanson, W and Thornburn, T. (1974) "Foundation Engineering." *John Wiley & Sons*. *
- FREDLUND, D. G. (1983) "Prediction of ground movements in swelling clays." 31ST Annual Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference, University of Minnesota.
- GIESE, Jr. R. F. (1977) "The influence of hydroxyle orientation, stacking sequence, and ionic substitutions on the interlayer bonding of micas." *Clay and clay minerals*, Vol 25, pp 102-104.
- GILLOTT, J. E. (1987) "Clay in engineering geology." *Elsevier*, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo. 468 pp. *

GRIM, R. E. (1948) "Some fundamental factors influencing the properties of soil materials." Proc 2nd I. C. S. M. F. E. Rotterdam Vol 3 pp 8-12. *

GRIM, R. E. (1968) "Applied Clay Mineralogy." McGraw-Hill Book Co, New York pp 422.

Highway Research Board Bulletin 349, (1962) "Physico-chemical phenomena in soils" National Academie of Sciences, National Research Council.

HOLTZ, W. G and GIBBS, H. J. (1956) "Engineering properties of expansive clays." Transactions, A. S. C. E. vol 121 pp 641-663.

JENNINGS, J. E and KNIGHT, K. (1957) "The prediction of total heave from the double oedometer test." Symposium on expansive clays, South African Institute of Civil Engineers, JOHANSBURG. *

JOHNSON, L. D. (1978) "Predicting potential heave and heave with time in swelling foundation soils." Technical Report S-78-7, U.S. Army Corps of Engineers, Waterway Experiment Station, VICKSBURG, MISS.

JOHNSON and SNETHEN, (1979) "Prediction of potential ^{Effort} heave of swelling soil." A. S. T. M. pp 117-125.

KAARSBERG, E. A. (1959) "Introductory studies of natural and artificial argillaceous aggregates by sound-propagation and X-ray diffraction methods." Jou Geol. Vol 67 N°4 pp 447-472.

KEBAILI, M. (1990) "Mise en oeuvre et interprétation des essais standards A. S. T. M. sur les argiles gonflantes." Rapport de mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil, pp 178.

- KELLER, W. D and HAENNI, R. P, (1978) "Effect of micro-sized mixtures of kaolin minerals on properties of kaolinites." Clay and clay minerals, Vol 26, N° 6, pp 384-396.
- KOMORNIK, A and DAVID, D, (1969) "Prediction of swelling pressure of clays" J. ASCE, S. M. F. D., SM n°1, pp 209-225.
- LOW, P. F, (1973) "Fundamental Mechanisms Involved in Expansion of Clays as Particularly Related to Clay Mineralogy." Proceedings of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction, vol. 1.
- MARIOTTI, M (1984) "Caractéristiques des sols surconsolidés expansifs et conséquences de leur instabilité sur les problèmes de bâtiment et génie civil." *
- MIELENZ, R. C and KING, M. E (1958) "Physical-Chemical Properties and Engineering Performance of Clays." Bulletin California Division of Mines, Vol 169, pp 196-254.
- MITCHELL, J. E, (1960) "The application of colloidal theorie to the compressibility of clays interparticulaire forces in clay-water-electrolyte systems." Melbourne CSIRO. pp 292-298.
- NAYAK, N. V and CHRISTENSEN, R. W, (1971) "Swelling characteristics of compacted expansive soils." Clay and Clay Minerals, Vol 19, n°4. pp 251-261.
- NORMAN, L. E. J, (1958) "A comparison of values of liquid limit determined with apparatus with bases of different hardness." ⓧ
Geotechnique Vol 8 N°1 pp 79-91.
- OLSON, R. E and MERSI, G, (1970) "Mechanisms controlling compressibility of clays." J. S. M. F. D, A. S. C. E 96 SM6, pp 1863-1878.

- PARCHER, J. V and LIU, Mo. Co (1965) "Effect of structure and thixotropic hardening on the swell behaviour of compacted clay soil." Highway research Report N°103 pp 1-20.
- PECK, R Hanson, Wand Thornburn, T, (1974) "Foundation Engineering." John Wiley & Sons. *
- PENNER, E, (1963) "Anisotropic thermal conduction in clay sediments." International Clay Conference. Pergamon LONDON Vol 1 pp 365-376.
- POPESCU, M, (1980) "Behaviour of expansive soils with a crumb structure." 4th I. C. E. S.
- RANGANATHAM, B. V and SATYANARAYANA, B, (1965) "A rational method of predicting potential for compacted expansive clays." 6th I. C. S. M. F. E, Montréal pp 92-96.
- SCHNEIDER, G. L and POOR, A. R, (1974) "The prediction of soil heave and swell pressures developed by an expansive clay." Research Report TR-9-74, University of TEXAS Construction Research Center, ARLINGTON, TEXAS.
- SEED, H. B WOODWARD, R. J and LUNDGREN, R, (1962) "Prediction of swelling potential for compacted clays." J. S. M. F. D, Proc A. S. C. E, Vol 88 n°SM3, Part 1, pp 53-87.
- SEED, H. B WOODWARD, R. J and LUNDGREN, R, (1964) "Fundamental aspects of the ATTAERBERG limits." J. S. M. F. D., Proc A. S. C. E. 4140, SM6 pp 75-105. *
- SRIDHARAN, A and VENKATAPPA RAO, G, (1970) "Basic mechanisms controlling volume changes in clays." Publication 35. Annual Report of the Department of Civil and Hydraulic Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, INDIA.

- SRIDHARAN, A and VENKATAPPA RAO, G, (1970) "Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept." *Geotechnique* 33 N°3pp 359-382.
- TAS, M, (1992) "Influence des procédures expérimentales sur l'estimation en laboratoire des paramètres de gonflement des argiles expansives." Thèse de Magister 157 P.
- TERZAGHI, K, (1926) "Simplified soil tests for subgrades and their physical significance." *Public Roads*.
- TOURTELOT, H. A, (1973) "Geologic origin and distribution of Swelling Clays," *Proceedings of Workshop on expansive Clay and Shale in Highway Design and Construction, vol.1.*
- VAN DER MERWE, (1964) "The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils." *The civil engineer in South Africa, Vol 6 n°6. pp 103.*
- VIJAYVERGIYA, V. N and GHAZZALY, O. I, (1973) "Prediction of swelling potential for natural clays." *Proc of 3rd I.C.E.S, Vol 1, Jurassalem Academic Press, JURASSALEM.*
- WEAVER, C. E, (1956) "The distribution and identification of mixed-layer clay in sedimentary rocks." *American Mineral, Vol 41, pp 220-221.*
- WARKENTEN, B. P BOLT, G. H and MILLER, R. D, (1957) "Swelling pressures of Montmorillonite." *Soil Sci.Soc.Proc. Vol 21 pp 495-497.*
- WINKELMOLEN, A. M, (1972) "Dielectric anisotropy and grain orientation." *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol Vol 56 N°11 pp 2150-2159.*
- YONG, N. Y and WARKENTIN, B. P, (1975) "Soil properties ans behaviour." Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York. 449 pp.