



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH

FACULTÉ DES SCIENCES PRATIQUES

DÉPARTEMENT D'HYDRAULIQUES ET GÉNIE CIVIL

MEMEOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En Génie Civil

Option : Géo-Matériaux

Présenté par : AMIEUR Abdenacer

Thème

Contribution à l'étude de gonflement des argiles en fonction de la nature d'eau (eau potable, eau de drainage et eau usée)

Soutenu publiquement le : 20 /05 / 2015

Devant le jury :

Mr. KRIKER Abdelouahed	Professeur	U. Ouargla	Président
Mr. BOUTOUTAOU Djamel	Professeur	U. Ouargla	Directeur de mémoire
Mr. BENTABBA Med. Tahar	Professeur	U. Ouargla	Examineur
Mr. NEZLI Imad Eddine	Maître de conférences A	U. Ouargla	Examineur

DÉDICADE

Je dédie ce modeste travail à :

- La mémoire de mon père ;
 - Ma très chère mère
 - Mes frères et sœurs
 - Ma femme et mes enfants
 - Mes amis

AMIEUR Abdenacer

Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à mon directeur de thèse le Professeur BOUTOUTAOU Djamel pour la bienveillance avec laquelle il a guidé mon travail, pour son soutien, ainsi que pour les précieux conseils qu'il m'a prodigués. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je tiens à remercier vivement Monsieur KRIKER Abdelouahed, Professeur à l'université d'Ouargla, qu'il m'a fait un grand honneur de présider mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur BENTABA Mohamed Taher, Professeur à l'université d'Ouargla et Monsieur NEZLI Imad Eddine, Maître de conférences à l'Université d'Ouargla qui ont accepté d'être examinateurs de mon travail.

J'en profite de remercier Monsieur Hafsi Abdelatif, enseignant associé à l'université d'Ouargla et chef de département laboratoire au L.T.P.Sud qui m'a fait l'honneur de participer à mon jury.

Je voudrais également remercier l'ensemble de personnel du L.T.P.Sud pour leur soutien durant l'élaboration de ce travail et en particulier messieurs : Haouache M. , Belmokhar M., Ben Komar B. et Almaoui M.

Mes remerciements vont aussi au personnel du laboratoire de l'ADE de Ghardaïa, en particulier Mme Amieur A.

J'associe à ces remerciements toutes les personnes qui, directement ou indirectement ont contribué à la réalisation de ce travail.

En fin, j'adresse un très grand merci à mes amis en particulier le très cher Said GABANI, qui m'a toujours soutenu et encouragé.

Résumé :

Les sols argileux sous l'effet d'arrivée et de départ d'eau sont soumis aux phénomènes de gonflement et de retrait, ces derniers jouent un rôle important dans la stabilité des ouvrages fondés sur ce type de sol. Ces phénomènes sont généralement gouvernés par plusieurs facteurs internes (lié au sol et ses caractéristiques intrinsèques) comme la minéralogie de l'argile et externes (reliée au milieu environnementale) tel que la nature d'eau d'hydratation.

Des travaux de recherche ont étudié plusieurs paramètres influençant le phénomène de gonflement, ils sont souvent controversés vu la complexité du phénomène. Le présent travail est une contribution à l'étude de l'influence de la nature d'eau sur le gonflement des argiles.

Le problème a été traité avec une approche expérimentale qui consiste à étudier le gonflement de deux types d'argile connus ; argile d'In Amenas et celle d'In Salah, sous l'effet de quatre types d'eau prélevés de la nature ; eau distillée, eau de drainage, eau potable et eau usée.

Les résultats obtenus ont montré que la nature d'eau d'hydratation a une influence sur les différents facteurs caractérisant le gonflement d'une argile, cette influence n'est pas proportionnel à chaque type d'eau mais elle est aussi liée à la minéralogie et la densité de l'argile.

Mots clés : Argile, gonflement, retrait, facteurs, interne, externe, eaux, nature, influence, expérimentale hydratation, minéralogie, densité.

ملخص :

تتعرض الأراضيات الطينية تحت تأثير قدوم و ذهاب الماء عنها إلى ظاهرتي الانتفاخ و الانكماش , تلعب هاتين الظاهرتين دورا أساسيا في استقرار المنشآت المؤسسة على هاتين الأراضيات. على العموم تتحكم في هاتين الظاهرتين عدة عوامل منها الداخلية (المرتبطة بالتربة و خواصها الذاتية) مثل التركيبية المعدنية للطين و الخارجية (المرتبطة بالمحيط الخارجي) كما هو الحال بالنسبة لمياه التروية.

قامت عدة بحوث بدراسة العوامل المختلفة المؤثر في ظاهرة انتفاخ التربة الطينية و كانت في أغلب الأحيان محل نقد ومناقشة بالنظر إلى تعقيدات الظاهرة. يدخل هذا العمل في إطار المساهمة في دراسة تأثير نوعية الماء على ظاهرة انتفاخ التربة الطينية.

تمت معالجة المسألة بمقاربة تجريبية تمثلت في دراسة انتفاخ نوعين معروفين من الطين هم : طين منطقة عين امناس و طين منطقة عين صالح , تحت تأثير أربعة أنواع من المياه الموجودة في الطبيعة هي : الماء المقطر , ماء التصريف , الماء الصالح للشرب و أخير ماء الصرف الصحي .

النتائج المحصل عليها من هذه الدراسة بينت أن نوعية المياه لها تأثير على مختلف العوامل المميزة لظاهرة الانتفاخ وأن هذا التأثير ليس منحصرًا على نوعية الماء وحدها ولكنه مرتبط أيضا بكثافة و تركيبية التربة الطينية

الكلمات الاستدلالية: الطينية، الماء، الانتفاخ، الانكماش، عوامل ، التركيبية المعدنية ، التروية، تجريبية ، نوعية ، الذاتية، الخارجية ، تركيبية، كثافة

Abstract :

Clay soils under the effect of arrival and departure of water are subject to swelling and shrinking phenomena, they play an important role in the stability of structures based on this type of soil. These phenomena are usually governed by several internal factors (related to the soil and his intrinsic characteristics) such as clay mineralogy and external (connected to the environment) as the nature of water of hydration.

Research works have studied several parameters influencing the swelling phenomenon; they are often controversial because of the complexity of the phenomenon. This work is a contribution to the study of the influence of the water nature on the swelling of clays. The problem was treated with an experimental approach of studying the swelling of two known types of clay; Clay of In Amenas and the one of In Salah, under the effect of four types of water taken from nature; distilled water, drainage water, drinking water and wastewater.

The obtained results have shown that the nature of water of hydration affects the various factors characterizing the swelling of clay; this influence is not proportional to each type of water but it is also related to mineralogy and the density of the clay.

Keywords: Clay, swelling, shrinking, factors, internal, external, water, nature, influence, experimental hydration, mineralogy, density.

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Représentation d'un assemblage compact	9
Figure I-2 : Représentation de disposition hexagonale	9
Figure I-3 : a) Unité tétraèdre à cœur de Silicium ; b) Schéma d'une couche de tétraèdre	10
Figure I-4 : a) Unité Octaédrique b) Structure en couche à base d'octaèdre	10
Figure I-5 : Structure d'une argile de type TO(1 :1)	11
Figure I-6 : photographie au microscope électronique à balayage des argiles	12
Figure I-7 : Types d'eau dans le sol	14
Figure II-1 : Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation	18
Figure II-2: Schéma de la double couche d'eau entourant une particule argileuse	21
Figure II-3: Forces agissant sur deux particules d'argile	23
Figure II-4: Phénomène osmotique idéal cité par	24
Figure II-5: La consistance d'un sol.	29
Figure II-6: <i>Diagramme de Casagrande</i>	33
Figure II-7 : Courbe de gonflement en fonction du temps.	38
Figure III-1: Situation géographique de la ville d'In Amenas	43
Figure III-2: Situation géographique de la ville d'In Salah.....	47
Figure IV-1: Représentation Graphique des résultats de l'analyse granulométrique (argile d'In Amenas)	56
Figure IV-2: Représentation des résultats de l'essais de détermination des limites d'Atterberg(argile d'In Amenas) sur le Diagramme de Casagrande	57
Figure IV-3 : Diagramme radio cristallographique de l'argile d'In Amenas	60
Figure IV-4: Représentation Graphique des résultats de l'analyse granulométrique	64
Figure IV-5: Représentation des résultats de l'essais de détermination des limites d'Atterberg(argile d'In Salah) sur le Diagramme de Casagrande	65
Figure IV-6: Diagramme radio cristallographique de l'argile d'In Amenas	67
Figure V-1 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant l'eau distillée	77
Figure V-2 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant l'eau Potable	77
Figure V-3 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant l'eau de la nappe.....	78
Figure V-4 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant l'eau usée.....	78
Figure V-5 : Les courbes de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant les quatre eaux	79
Figure V-6: Histogrammes montrant l'évolution de la contrainte de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Amenas)	80
Figure V-7: Histogrammes montrant l'évolution du Taux de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Amenas)	80
Figure V-8 : Histogrammes montrant l'évolution du Rapport de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Amenas)	81
Figure V-9 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Amenas sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau distillée	82
Figure V-10 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Amenas sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau de robinet.....	82
Figure V-11: développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Amenas sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau de la nappe.....	83
Figure V-12 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Amenas sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau usée	83
Figure V-13 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Amenas) sous une contrainte :0.10 bars.....	84
Figure V-14: Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Amenas) sous une contrainte :0.50 bars.....	84

Figure V-15 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Amenas) sous une contrainte : 1.0 bars.....	85
Figure V-16 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Amenas) sous une contrainte : 1.50 bars.....	85
Figure V-17: La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant l'eau distillée	87
Figure V-18 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant l'eau Potable.....	87
Figure V-19 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant l'eau de la nappe	88
Figure V-20: La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant l'eau usée	88
Figure V-21 : Les courbes de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant les quatre eaux.....	89
Figure V-22: Histogrammes montrant l'évolution de la contrainte de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Salah).....	90
Figure V-23: Histogrammes montrant l'évolution du taux de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Salah)	90
Figure V-24: Histogrammes montrant l'évolution du rapport de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Salah).....	91
Figure V-25 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Salah sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau distillée	92
Figure V-26: développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Salah sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau de la nappe.....	92
Figure V-27: développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Salah sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau de la nappe.....	93
Figure V-28 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Salah sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau usée	93
Figure V-29 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Salah) sous une contrainte : 0.10 bars.....	94
Figure V-30 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Salah) sous une contrainte : 0.50 bars.....	94
Figure V-31: Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Salah) sous une contrainte : 1.0 bars.....	95
Figure V-32 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Salah) sous une contrainte : 1.50 bars.....	95

LISTE DES PHOTOS

Photos IV-1 : photos satellite du lieu de prélèvements des échantillons à In Amenas	54
Photos IV-2 : Echantillon d'argile de la région d'In Amenas	55
Photos IV-3 : photos satellite du lieu de prélèvements des échantillons à In Salah.....	61
Photos IV-4 : Dégradation de la piste de l'aérodrome d'In Salah sous l'effet de gonflement de l'argile.....	62
Photos IV-5 : prélèvements d'échantillon d'argile à partir d'un puits creusé a côté de la piste de l'aérodrome d'In Salah.....	62
Photos IV-6 : Echantillon d'argile d'In Salah	63
Photos IV-7 : Echantillon d'eau distillée	68
Photos IV-8 : Echantillon d'eau potable.....	68
Photos IV-9: Echantillon d'eau de la nappe (drainage).....	69
Photos IV-10 : Echantillon d'eau usée	69
Photos V-1 : les oedomètres utilisés pour les essais de gonflement (salle de M.D.S au niveau du L.T.P.Sud à Ghardaïa)	74
Photos V-2 : les éprouvette confectionnées à partir des échantillons des deux argiles (la rouge argile d'In Amenas et la violée Celle d'In Salah)	75
Photos V-3: système d'application des charges sur l'Oedomètre	75
Photos V-4: les éprouvettes de l'argile d'In Amenas récupérées à la fin de l'essai.....	76
Photos V-5 : les éprouvettes de l'argile d'In Salah récupérées à la fin de l'essai	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Dimensions caractéristiques des minéraux argileux.....	12
Tableau II-1 : Capacités d'échange des cations de quelques argiles	26
Tableau II-2 : Surfaces spécifiques de quelques minéraux argileux	27
Tableau II-3 : activités de quelques particules argileuses.....	29
Tableau II-4: Surfaces spécifiques, valeurs au bleu et C.E.C. de quelques minéraux argileux	30
Tableau II-5 : Relation de potentiel de gonflement avec un seul paramètre	31
Tableau II-6: Relation de potentiel de gonflement avec deux paramètres	31
Tableau II-7 : Relation de potentiel de gonflement avec trois paramètres.....	32
Tableau III-1 : Moyennes des précipitations mensuelles relevées à In-Aménas (1975-1984).	45
Tableau III-2 : Températures moyennes mensuelles de période 1981-2012	51
Tableau III-3 : précipitations moyennes mensuelles de période 1981-2012.....	52
Tableau III-4 : Evaporations moyennes mensuelles de la période entre 1981 et 2012.....	52
Tableau IV-1 : Composition chimique et minéralogiques de l'argile d'In Amenas	59
Tableau IV-2 : Composition chimique et minéralogiques de l'argile d'In Salah	66
Tableau IV-3 : Caractéristiques physico-chimiques des quatre types d'eau	70
Tableau V-1: Caractéristiques de gonflement de l'échantillon d'In Amenas.....	79
Tableau V-2 : Caractéristiques de gonflement de l'échantillon d'In Salah	89

Notations utilisées

σ : contrainte totale
 σ' : contrainte effective ;
 u : la pression interstitielle.
 Z : côte de terrain
 γ_w : Poids volumique de l'eau
 H : Hauteur ;
 σ_{cap} : la tension de la surface
 ρ_{cap} : le rayon capillaire,
 Θ_{cap} : l'angle de contrainte solide/fluide
 γ_f : le poids volumique du fluide.
 u_w : pression de l'eau
 u_a : Pression d'aire
 u^* : pression interstitielle équivalente
 χ : coefficient qui dépend du degré de saturation
 σ_e : contrainte extérieure
 $1/K$: l'épaisseur de la double couche;
 ϵ_{liq} : la constante diélectrique du milieu liquide ;
 k : la constante de Boltzmann ;
 T : la température;
 e : la charge électrique d'un électron ;
 Z : la valence des cations ;
 C_{liq} : concentration ionique du milieu liquide ;
 P_r : la pression osmotique de répulsion
 U : le potentiel électrique au milieu des particules ;
 d : demi-distance interparticulaire ;
 P_A : la force surfacique d'attraction
 I_P : Indice de plasticité
 I_R : Indice de retrait ;
 W_L : Limite de liquidité ;
 W_P : Limite de plasticité ;
 W_R : Limite de retrait ;
 A : Activité des particules argileuses ;
 S_p : Surface spécifique ;
 V_B : Valeur au bleu de méthylène ;
 $C.E.C$: Capacité d'échange cationique
 P_2 : Pourcentage des particules dont le diamètre est inférieur à 2 μm ;
 P_{74} : Pourcentage des particules dont le diamètre est inférieur à 74 μm ;
 P_g : pression de gonflement ;
 γ_d : poids volumique sec ;
 W : la teneur en eau ;
 ϵ_g : taux de gonflement libre ;
 ϵ'_g : taux de gonflement sous pression ;
 σ_v : contrainte de confinement ;
 G_p : gonflement primaire ;
 G_s : gonflement secondaire;
 ΔH_f : la variation de la hauteur de l'éprouvette sous la contrainte d'essai lors de la phase d'imbibition
 H_i : hauteur de l'échantillon avant imbibition ;
 σ : contrainte appliquée ;
 σ_g : contrainte de gonflement ;
 R_g : rapport de gonflement ;

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE :	4
Problématique :	4

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : LES AGILES, DÉFINITIONS ET COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

1- Définition :	7
2- Formation des argiles:.....	7
3- Composition minéralogique des argiles :.....	7
4- La micro texture des argiles :	8
4.1. Terminologie :.....	8
4.2. Structure de base :	8
5- Classification des minéraux argileux :	11
5.1. La KAOLINITE :.....	11
5.2. La MONTMORILLONITE :	12
5.3. L'ILLITE :	12
5.4. La CHLORITE :.....	12
5.5. Les INTRASTRATIFIÉS :	12
6- ECHANGE IONIQUES :.....	13
7- CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE (C.E.C) :.....	13
8- DIFFERENTS TYPES DE LIAISONS AU SEIN DES MATERIAUX ARGILEUX :	13
9- INTERACTION ARGILE-EAU	14
9-1 Le comportement des sols argileux en fonction de la teneur en eau :.....	15
9-2 Les effets de la dessiccation sur les sols argileux :	15

Chapitre II : LE PHÉNOMÈNE DE GONFLEMENT

1- Introduction :.....	17
2- Description du phénomène de gonflement :	17
2.1. Le Gonflement Cristallin (Interparticulaire) :	17
2.2. Le Gonflement Interfoliaire (Intraparticulaire) :	17
3- Mécanisme de gonflement :	18
3.1. Le Sens mécanique de gonflement :	18
3.2. Le Sens Physico-chimique de gonflement :	21
4- Facteurs affectant le gonflement :	26
4.1. Facteurs intrinsèques:	26
4.2. Facteurs externes:	27
5- Evaluation qualitative du gonflement :	28
5.1. Les paramètres utilisés pour évaluer le gonflement d'une argile:.....	28
5.2. Approches empiriques:	31

5.3.	Estimation qualitative par l'abaque de Casagrande:	33
6-	Estimation quantitative par des corrélations:.....	33
6.1.	Pression de gonflement:	34
6.2.	Amplitude de gonflement:.....	34
7-	Méthodes directes de mesure du gonflement:.....	35
7.1.	Essais de gonflement au laboratoire:	35
7.2.	Essais de gonflement in situ:.....	37
8-	Evolution du gonflement:.....	38
8.1.	Evolution du gonflement en fonction du temps:	38
8.2.	Cinétique du gonflement:	39

PARTIE EXPÉRIMENTALE

INTRODUCTION.....	41
-------------------	----

Chapitre III : PRÉSENTATION DES ZONES D'ÉTUDE

1.	Introduction :.....	43
2.	Région d'In Amenas :	43
2.2.	Situation géographique :.....	43
2.2.	Contexte Géologique.....	44
2.3.	Climatologie.....	45
3.	Région d'In Salah :	47
3.1.	Situation géographique :.....	47
3.2.	Contexte Géologique.....	47
3.3.	Climatologie :.....	51

CHAPITRE IV : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

1.	Introduction :.....	54
2.	Argile de In Amenas :	54
2.1.	Lieu de Prélèvement :.....	54
2.2.	Description visuelle de l'échantillon :.....	55
2.3.	Détermination des caractéristiques de l'échantillon:	56
3.	Argile d'In Salah :	61
3.1.	Lieu de Prélèvement :.....	61
3.2.	Description visuelle de l'échantillon :.....	63
3.3.	Détermination des caractéristiques de l'échantillon:	64
4.	Les eaux.....	68
4.1.	Lieu de Prélèvement :.....	68
4.2.	caractéristiques physico-chimiques.....	70
5.	Conclusion :.....	71
5.1.	Argile de In Amenas :	71
5.2.	Argile d'In Salah :.....	71
5.3.	Eaux :.....	71

CHAPITRE V : ETUDE DE GONFLEMENT

1.	Introduction :.....	73
2.	Protocoles d'essai :	73
3.	Présentation des essais :	74

- 4. Résultats des essais : 76
 - 4.1. Argile de In Amenas : 76
 - 4.2. Argile d’In Salah : 86
- 5. Conclusion: 96

CONCLUSION GENERALE

- CONCLUSION GENERALE 98
- Recommandations 100
- Perspectives 100
- REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE 101

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

L'hydratation et la dessiccation des sols gonflantes est la cause de nombreuses dommages dans le secteur de bâtiment et travaux publics, il s'agit de fissuration dans les éléments structuraux des bâtiments, des soulèvements dans les fonds des fouilles, des désordres dans les chaussées et des ruptures dans les conduites.

Jusque vers les années 1930 seul le phénomène de tassement était considéré comme cause géotechnique des dégâts des fondations, le bureau de réclamation des états unis (USBR) est le premier qu'a met l'accent sur le phénomène de gonflement, les études qualitative et quantitative du phénomène ne débiteront réellement qu'au début des années 1970 avec la communication de Huder et Amberg qui ont présenté la méthode de mesure des gonflements.

Les effets de gonflement se traduisent par des fissurations en façades, souvent obliques et passant par les points faibles qui constituent les ouvertures. Les désordres se manifestent aussi par des décollements entre les éléments jointifs, ainsi que par une distorsion des portes et fenêtres, une dislocation des dallages et des cloisons, et parfois la rupture des canalisations ce qui vient aggraver les désordres car les fuites d'eau qui en résultent provoquent des gonflements localisés.

Les maisons individuelles sont les principales victimes de phénomène de gonflement, ceci pour au moins deux raisons :

- La structure légère et peu rigide de ces bâtiments, et surtout leur ancrage superficiel par rapport au immeubles collectifs ;
- L'absence des études géotechniques préalables qui permettraient l'identification de la présence des argiles gonflantes et de concevoir le bâtiment en prenant en compte le risque associé

La limitation de ces dégâts impose une meilleure reconnaissance des différents paramètres qui ont des relations directes et indirects sur ces aléas. En effet plusieurs projets de recherche ont été réalisés par les géotechniciens afin de cerner certains paramètres.

Le phénomène de gonflement des argiles est un domaine assez complexe qui ouvre des opportunités de recherche très vaste vu la diversité des paramètres qui l'influencent.

L'influence de l'eau sur le gonflement des argiles est primordiale, car on ne peut pas parler d'un gonflement sans la présence d'eau, d'autre part l'eau dans la nature n'est pas uniforme, elle se trouve sous plusieurs aspect et dans différentes conditions. Donc l'étude de

gonflement en tenant compte de la nature d'eau est une priorité pour résoudre pas mal de problèmes de ce phénomène.

Ainsi, le présent travail consiste à une contribution à l'étude de gonflement des argiles en fonction de la nature d'eau, deux types d'argile ont été étudiés il s'agit de celle de In Amenas et celle de In Salah en utilisant quatre type d'eau: Eau distillée, Eau potable, Eau de drainage et en fin l'Eau usée.

Le travail est divisé en deux parties à savoir :

Une recherche bibliographique : elle permet de récolter les différentes informations et définitions ainsi que les expériences faites par les chercheurs, cette partie est divisée en deux chapitres :

Le premier concerne la définition des argiles, leurs compositions chimiques et minéralogiques, la détermination des caractéristiques physiques et mécaniques ainsi que l'interaction argile – eau à travers les différents phénomènes qui se produit sous l'effet de cette interaction ;

Le deuxième chapitre se penche sur le phénomène de gonflement, son mécanisme, les paramètres influençant et les méthodes d'évaluations.

Une étude expérimentale : elle concerne l'étude des cas pratiques, elle est divisée en trois chapitres :

Le premier chapitre : présentation des zones d'étude ;

Le deuxième chapitre concerne l'identification des matériaux utilisés dans cette étude ;

Le troisième chapitre est réservé à l'étude de phénomène de gonflement des deux argiles en changeant la nature d'eau, ainsi que l'interprétation et la discussions des résultats ;

En fin une conclusion générale, sur l'ensemble de travail qui permet de résumer les différents résultats obtenus à partir des expériences faites et de tirer des recommandations pour des futures exploitations.

Problématique :

Le gonflement des sols fins notamment les argiles est considéré parmi les problèmes les plus complexes dans la géotechnique, plusieurs études de recherche ont été entreprises dans ce contexte, ils ont étudié les différents paramètres influençant le phénomène de gonflement.

Le phénomène de gonflement est surtout lié à la présence d'un sol fin (argile) et son contact avec l'eau, donc ces deux paramètres parmi autres sont les plus étudiés par les géotechniciens.

Les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques de l'argile sont les paramètres essentiels qui influent le gonflement d'une telle argile, plusieurs chercheurs ont étudié l'influence de ces paramètres sur le comportement de l'argile vis-à-vis de phénomène de gonflement ainsi que la possibilité d'améliorer certaines caractéristiques.

D'autre part l'eau est un acteur principal dans le phénomène de gonflement des argiles, sa nature, sa composition chimique et ces caractéristiques physiques peuvent influencer sur ce phénomène complexe;

Le problème posé : est ce que l'argile gonfle de la même façon lorsqu'elle est en contact avec différent type d'eau.

Le présent travail consiste à étudier le cas de deux argiles de la région du Sud Algérien : Argile de In Amenas et celle d'In Salah avec quatre types d'eau différents : Eau distillée (comme témoin), Eau potable, l'Eau de drainage (eau superficielle) et l'Eau Usée.

Les résultats obtenus permis de revoir les essais et de prendre les précautions nécessaires lors de l'étude d'une argile.

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Les Argiles, définitions et composition minéralogique

1- Définition :

L'origine du mot Argile est la notion grec « argilos » qui signifie blanc.

La définition des argiles est vaste, elle n'est pas la même dans la géologie, la géotechnique, et l'industrie ; elle désigne une famille de roche, un ensemble de particules minérales, une catégorie de sol, une classe granulométrique ou encore un matériau de construction.

Cette appellation générique englobe une variété de matériaux dont le facteur commun est de posséder des minéraux argileux qui sont de nature bien précise (à base de silicates) et dont leur structure les confère des propriétés bien spécifiques notamment leur interaction avec l'eau.

En mécanique des sols on définit la fraction argileuse d'un sol comme étant la teneur en particules dont le diamètre est inférieur à 2 μ m. D'autre part le matériau est dit argileux s'il contient plus de 50% de minéraux argileux (avec une faible quantité de matière organique).

En fait, on peut appeler argile une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux, silicates d'aluminium en général plus ou moins hydratés qui présentent une structure feuilletée, capacité plastique, ou bien une structure fibreuse (capacité d'absorption).

2- Formation des argiles:

Les argiles proviennent de l'altération, l'érosion et la dégradation des roches sédimentaire : l'altération physique sous l'effet des vents et les variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fines.

Les conditions et les milieux dans lesquelles se produisent ces dégradations ainsi que leur état d'avancement peuvent justifier la grande diversité des argiles (Jackson&Sherman, 1953).

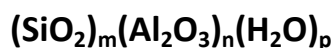
3- Composition minéralogique des argiles :

La composition minéralogique des sols dépend directement de celle de la roche mère, l'altération peut cependant modifier cette composition (dissolution, réaction, échange).

Les minéraux argileux sont des substances cristallines dont l'origine est l'altération chimique de certains minéraux composant la roche mère. La famille des minéraux argileux regroupe tous les silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates. Sur le plan chimique, ce sont des aluminosilicates hydriques ajoutés à d'autres ions métalliques (Holtz et al, 1991) (Holtz W.G. et Gibbs H.J., 1991).

Ils sont composés de particules de formes aplaties et de dimensions infiniment petits, les cristaux ressemblent à des plaques minces ou plaquettes.

La formule chimique des minéraux argileux (cité par (Hafsi A. 1. , 1993) est :



4- La micro texture des argiles :

4.1. Terminologie :

Pour éviter une confusion entre les termes, il est nécessaire de rappeler la terminologie utilisée dans la minéralogie des argiles, parfois un terme est utilisé pour indiquer plusieurs niveaux structuraux différents, par contre deux termes différents sont parfois utilisés pour désigner le même niveau (GAOMBALET J., 2004).

Cristallite : la cellule de base des minéraux argileux, elle est constituée d'une **Feuillet** (layer) et d'une **Interfeuillet** (interlayer), appelée aussi espace interfoliaire (GAOMBALET J., 2004).

Feuillet : formée de superposition de deux ou trois **couches** (sheets) cristallisées (c.a.d dans lesquels les atomes solides à température ordinaire sont régulièrement distribués).

Interfeuillet : il est constitué de fluide (eau) assurant une liaison électrochimique entre les feuillets.

Particule d'argile : elle résulte de l'empilement face à face de quelque cristallites élémentaires, elle est parfois formée d'un seul cristallite (en anglais, le terme particule désigne bien souvent le cristallite lui-même). Il arrive aussi que le terme cristallite soit lui-même employé pour désigner un empilement de plusieurs feuillets

4.2. Structure de base :

Le cristallite (unité structurel) est composé d'un feuillet et d'un interfeuillet, le feuillet de son tour est formé de deux ou trois couches.

Chaque couche est formée d'unités structurales de base par empilement d'ions ou d'hydroxydes en disposition hexagonale ou compacte :

4.2.1. Disposition des oxygènes :

Il existe deux arrangements, l'un n'est valable que pour les ions oxygènes, l'autre pour les ions oxygènes et les hydroxydes (Chaillers S. Hennin S. Rautureau M., 1982) .

a) **Assemblage compact** : Arrangement valable pour les ions oxygènes et les hydroxydes, on peut considérer que les atomes ont la forme d'une sphère et sont en contact dans des plans successifs, ils sont disposés de tel façon que les centres de ces sphères se situent sur des droites parallèles entre elles, les sphères appartenant à deux rangs contigus sont décalées d'un rayon. Les centres des deux sphères appartenant à une ligne voisine sont situés au sommet d'un triangle équilatéral (Chaillers S. Hennin S. Rautuream M., 1982) (figure I-1)

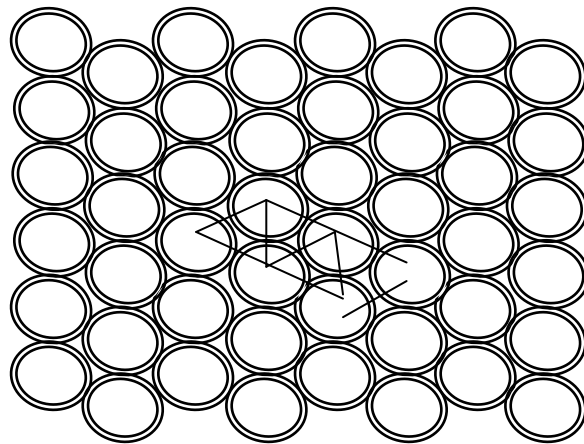


Figure I -1: Représentation d'un assemblage compact (Chaillers S. Hennin S. Rautuream M., 1982), (HARRAT M., 2007)

b) **Disposition hexagonal** : cette disposition valable pour les ions oxygène, il est obtenue de l'arrangement compact en retirant une sphère sur deux tous les deux rangs [20], on peut constater que chaque cavité est limitée par 6 sphères, on pourrait y situer un hexagonal, c'est pour quoi on l'appelle parfois un plan hexagonal.

La superposition d'un plan hexagonal et un plan compact forme des tétraèdres, et deux plans compacts forment un octaèdre

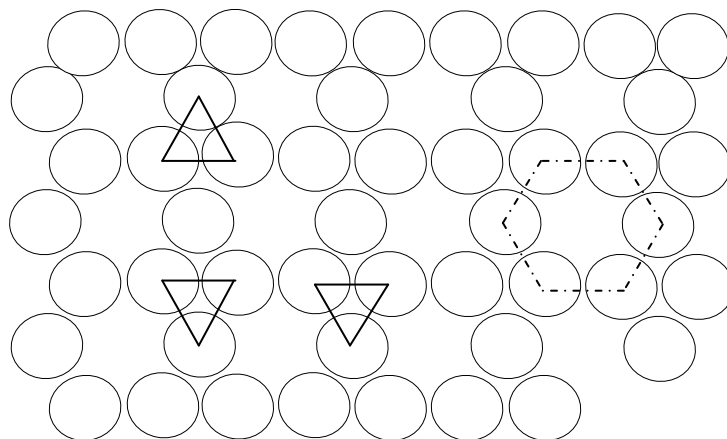


Figure I-2 : Représentation de disposition hexagonale (Chaillers S. Hennin S. Rautuream M., 1982), (HARRAT M., 2007)

On distingue deux types de couches :

4.2.2. La couche tétraédrique :

Elle est formée de tétraèdre Si^{4+} entouré de quatre anions O^{2-} au sommet. Son épaisseur est de $4,6 \text{ \AA}$ et son bilan de charge est -1 (GAOMBALET J., 2004).

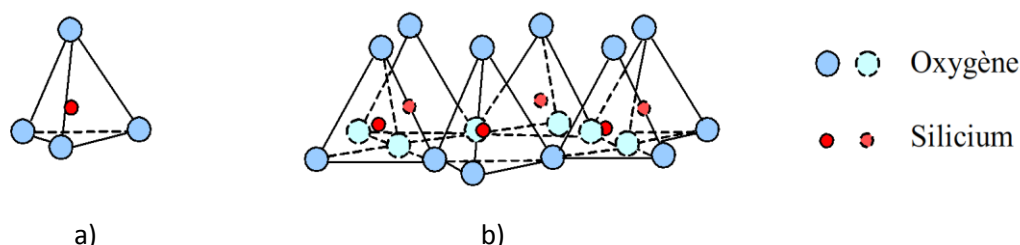


Figure I-3 : a) Unité tétraèdre à cœur de Silicium ; b) Schéma d'une couche de tétraèdre $[\text{Si}_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_2]^{6-}$ avec arrangement hexagonal (Cuisinier, 2002)

4.2.3. La couche octaédrique :

Elle est constituée par Al^{3+} (Gibbsite) ou Mg^{2+} (Brucite) entouré de six groupes hydroxyle OH^- . Son épaisseur est $5,05 \text{ \AA}$ et son bilan des charges est +1 (GAOMBALET J., 2004).

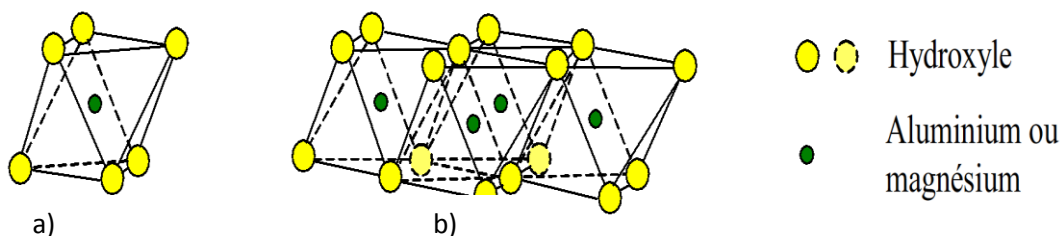


Figure I-4 : a) Unité Octaédrique b) Structure en couche à base d'octaèdre (Cuisinier, 2002)

4.2.4. Le type de feuillets TO ou 1 :1 :

Formé d'une couche tétraédrique T et d'une couche octaédrique O. Ces argiles, dont l'unité structurale de base est dissymétrique, sont représentées par le groupe des Kaolinites et des Sepentites, ces derniers sont beaucoup plus rare ;

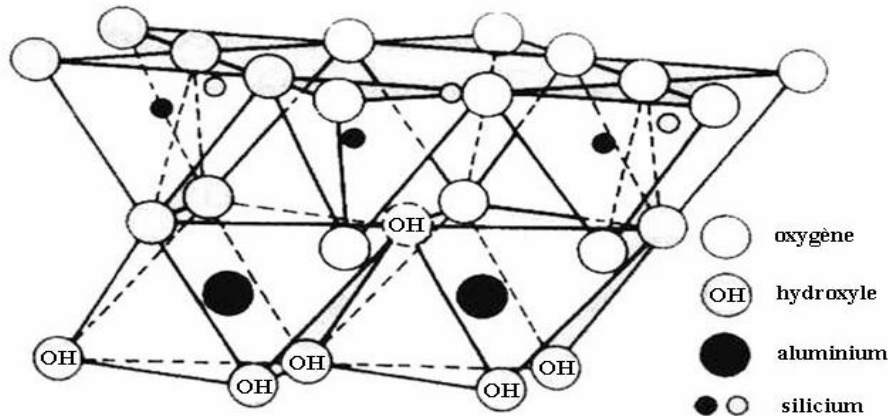


Figure I-5 : Structure d'une argile de type TO(1 :1) (GAOMBALET J., 2004)

4.2.5. Le type de feuillets TOT ou 2 :1 :

Formé d'une couche octaédrique O entourée de deux couches Tétraédrique T. Ces argiles, qui présentent une unité structurale de base symétrique comportent de nombreux groupes (Illites, Smectites, Interstratifiés, Chlorites, Vermiculites) dont la structure et les propriétés sont très variables.

5- Classification des minéraux argileux :

Les minéraux argileux sont des très petits cristaux colloïdal (de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$) qu'on ne peut pas voir qu'au microscope électronique. Les cristaux ressemblent à des minces plaques ou plaquettes constituées d'un empilement de feuillets à structure atomique répétée (Giroud et Coull ; 1972).

Les liaisons de covalence et les liaisons atomiques assurent les liens rigides de feuillet élémentaire ; des liaisons moins fortes mais très importantes et essentielles assurent l'assemblage des feuillets élémentaires pour former des particules d'argiles qui comportent un nombre de feuillets plus ou moins important selon le type d'argile.

Les forces de liaison entre les feuillets sont principalement les forces d'attraction moléculaires de Van Der Waals (liaison faibles), la liaison hydrogène (dans le cas des argiles, elle se forme avec des atomes fortement électronégatifs, généralement c'est l'oxygène) et les liaisons dues aux substitutions isomorphes.

Malgré la simplicité apparente de la structure des argiles, on dénombre un très grand nombre de type qui se distinguent par les défauts liés aux substitutions isomorphes au moment de la formation. On distingue les minéraux argileux les plus courants suivants :

5.1. La KAOLINITE ($\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Al}_4(\text{OH})_8$) :

Elle est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillet en octaèdre (alumine) ;

5.2. La MONTMORILLONITE $(OH)_4 Si_8 (Al_{10/3}, Mg_{2/3})O_{20} \cdot n H_2 O$:

Elle est constituée de couche octaédrique insérée entre deux couches tétraédrique, elle est considérée comme un minéral 2/1.

5.3. L'ILLITE $(K, H_2 O)_2 Si_8 (Al, Fe, Mg)_{4,6} O_{20}, (OH)_4$:

C'est une composante importante des minéraux argileux, l'illite est un minéral de type 2/1 comme la montmorillonite. Cependant les espaces entre les feuillets sont liés par des ions de potassium qui créent un lien très fort entre les couche, plus fort que le lien hydrogène.

5.4. La CHLORITE $(OH)_4 (SiAl)_8 (Mg,Fe)_6 O_{20}$:

Elle est moins fréquente que les trois précédentes, elle est constituée de deux feuillets de Montmorillonite reliés par une couche d'hydroxyde de magnésium.

5.5. Les INTRASTRATIFIÉS :

Ce sont des minéraux argileux dans lesquels alternent de façon plus ou moins régulière des feuillets de natures différentes ou, le plus souvent interfoliaires différents par exemple illite-montmorillonite, illite- chlorite.

Tableau I-1 : Dimensions caractéristiques des minéraux argileux

Nom	Type	Nombre de feuillets par particules	Diamètre d'une particule (Å°)
Kaolinite	1/1	100-150	1
Montmorillonite	2/1	1	0,1
Illite	2/1	10	0,3
Chlorite	2/1/1	1	0,1

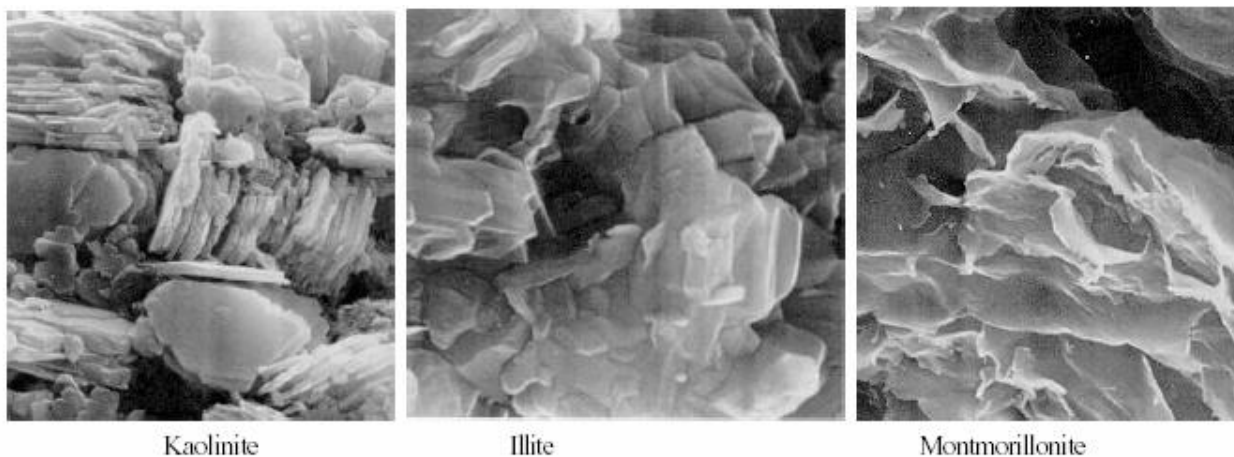


Figure I-6 : photographie au microscope électronique à balayage des argiles (Mitchell, 1976)

6- ECHANGE IONIQUES :

Une autre caractéristique importante des argiles est qu'elles appartiennent au groupe des silicates. Ce sont des aluminosilicates hydreux ajoutés à d'autres ions métalliques, ce qui leur permet de conserver les propriétés d'échangeurs de cations.

Lorsque les substitutions se produisent, un cation de valence élevée est remplacé par un cation de valence moins élevée, la particule d'argile acquiert alors une charge négative (Leroux, 1972).

La substitution de différents cations dans le feuillet octaédrique est fréquente et elle est à l'origine de différents minéraux argileux. Lorsque les ions de recharge sont à peu près de la même dimension, on qualifie cette substitution d'isomorphe.

7- CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE (C.E.C) :

La capacité d'échange cationique (C.E.C) est une caractéristique très importante dans l'étude d'une argile. Elle permet de caractériser un déficit de charge négative et présente la charge positive nécessaire pour atteindre la neutralité. En effet l'argile peut adsorber des cations H^+ , K^+ , Ca^{++} , NH_4^+ et des dipôles d'eau sur les faces basales et éventuellement dans les espaces interfoliaires. Ce phénomène de substitution superficiel d'ions est mesuré pour un sol argileux par sa C.E.C que l'on définit comme le nombre des milliéquivalent de cations susceptibles d'être adsorbés d'une façon réversible par 100 g de sol.

8- DIFFERENTS TYPES DE LIAISONS AU SEIN DES MATERIAUX ARGILEUX :

On peut distinguer les liaisons structurales très fortes (covalentes, ioniques) au sein des molécules mêmes et les liaisons particules minérales.

Les liaisons particules minérales sont classées par intensité de force croissante comme suit :

- ✓ **Les forces d'attraction moléculaires de VAN DER WAALS** : qui sont en partie responsable de l'extrême cohésion des argiles sèche ;
- ✓ **Les liaisons par introduction d'ions dans la structure** ;
- ✓ **Les liaisons d'hydrogène** de nature électrostatique ;
- ✓ **Les liaisons texturales** qui ne sont autres que la cimentation des particules par un apport externe (ex : marnes) ;

9- INTERACTION ARGILE-EAU

Le matériau argileux présente la particularité de voir sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau. Dur et cassant lorsqu'il est asséché, pour un certain degré d'humidité il se transforme en un matériau plastique et malléable. Ces modifications de consistance peuvent s'accompagner en fonction de structure particulière de certains minéraux argileux, de variations de volume plus ou moins conséquentes : forte augmentation de volume (phénomènes de gonflement) lorsque la teneur en eau augmente, et inversement, rétraction (phénomènes de retrait) lorsque la teneur en eau diminue.

Les phénomènes de capillarité, et surtout de succion, sont à l'origine de ce comportement.

Les variations de volume des sols argileux répondent donc à des variations de teneur en eau (il est à noter que les variations de contraintes extérieures –telles que les surcharges – peuvent par ailleurs, également générer des variations de volume).

Tous les sols présentent la particularité de contenir de l'eau en quantité plus ou moins importante :

L'eau de constitution : elle fait partie intégrante de l'organisation moléculaire des grains formant le sol ;

L'eau liée (adsorbée) : elle résulte de l'attraction entre les grains et l'eau (pression de succion), elle peut être représentée comme un film visqueux entourant le grain ;

L'eau interstitielle : elle représente l'eau remplissant les vides entre les grains du sol (lorsque ceux-ci sont entièrement remplis le sol est dit saturé)

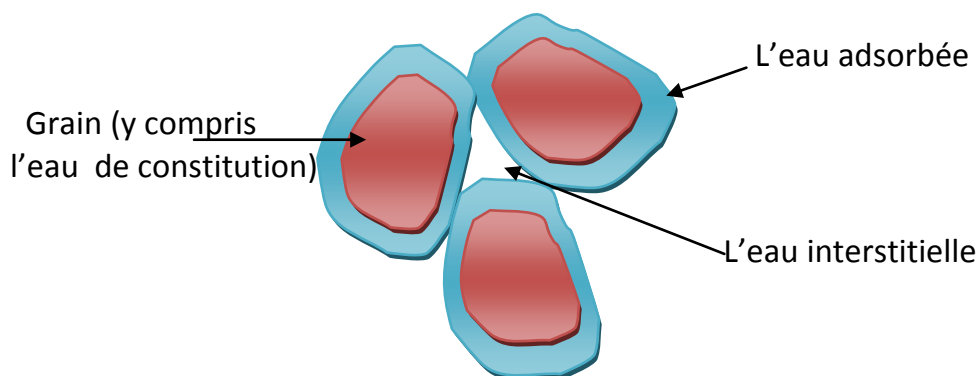


Figure I-7 : Types d'eau dans le sol

La part respective entre ces différents « types » d'eau, très variable dépend de la nature du sol et son état hydrique. En fonction de cette répartition, les sols auront une réponse différente vis-à-vis des variations de teneur en eau. Par exemple : plus la quantité d'eau adsorbée contenue dans le sol est grande, plus celui-ci est susceptible de faire le retrait.

9-1 Le comportement des sols argileux en fonction de la teneur en eau :

Les caractéristiques de la structure interne des minéraux argileux expliquent leur comportement face aux variations de la teneur en eau :

Ils présentent en effet une structure minéralogique (en feuillets), à la surface desquels les molécules d'eau peuvent s'adsorber sous l'effet de différents phénomènes physico-chimiques, et ce de façon d'autant plus marquée que les grains du sol, fins et aplatis, ont des surfaces développées très grandes. Il en résulte un gonflement, plus ou moins réversible, du matériau. L'eau adsorbée assure la liaison entre les grains et permet les modifications de structure du sol lors des variations de la teneur en eau ;

Certains grains argileux peuvent eux-mêmes voir leur volume changer, par variation de la distance entre les feuillets argileux élémentaires, du fait d'échanges d'ions entre l'eau interstitielle et l'eau adsorbée ;

Les pores du sol sont très fins et accentuent les phénomènes de capillarité.

Les familles des minéraux argileux ne présentent pas la même prédisposition au phénomène de retrait-gonflement. L'analyse de la structure minéralogique permet d'identifier les plus sensibles. Le groupe des interstratifiées fait partie des plus sujets au phénomène de gonflement. Cette sensibilité est liée :

- A des liaisons particulièrement lâches entre les feuillets constitutifs, ce qui facilite l'acquisition ou le départ d'eau. Cette particularité permet à l'eau de pénétrer dans l'espace situé entre les feuillets autorisant ainsi de fortes variations de volume (gonflement interfoliaire ou intercrystallin) ;
- Au fait que ces argiles possèdent une surface spécifique particulièrement importante ($800\text{m}^2/\text{g}$ pour la Montmorillonite et $20\text{m}^2/\text{g}$ pour la Kaolinite) et que la quantité d'eau adsorbée qui peut refermer un sol est directement fonction de ce paramètre.

9-2 Les effets de la dessiccation sur les sols argileux :

S'il est saturé le sol va d'abord diminuer de volume de façon à peu près proportionnelle à la variation de la teneur en eau, tout en restant quasi saturé. Cette diminution de volume s'effectue à la fois verticalement se traduisant par un tassement mais aussi horizontalement avec l'apparition de fissures de dessiccation.

En deçà d'une certaine teneur en eau (dite limite de retrait), le sol ne diminue plus de volume et les espaces intergranulaires perdent leur eau au bénéfice de l'air. Des pressions de succion se développent de façon significative. Lorsque le sol argileux non saturé s'humidifie, il se sature sans changement de volume. Il en résulte une annulation progressive des pressions de succion jusqu'à ce que l'argile retrouve son volume initial, voire le dépassé. Divers paramètres, dont la nature minéralogique de l'argile conditionne l'ampleur de ce gonflement.

Chapitre II : Le phénomène de gonflement

1- Introduction :

Dans le chapitre précédent nous avons abordé l'interaction argile-eau d'une manière générale, ce chapitre sera consacré au phénomène de gonflement ;

Le gonflement d'un sol argileux peut résulter de la diminution des contraintes en place après une excavation, un déchargement ou de l'imbibition du sol sous un état de contrainte constant. Il se traduit par une augmentation de volume du sol ou un accroissement des pressions régnant dans le milieu selon que le massif peut se déformer ou non. Le processus de gonflement est gouverné par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée dans le temps à l'échelle macroscopique. Les sols susceptibles de gonfler sous l'action d'eau et de sels dissous qu'elle contient sont généralement les sols argileux naturels, les sols argileux compactés, les marnes et les roches argileuses. Le processus de gonflement met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés ce qui complique l'étude du mécanisme de gonflement ;

2- Description du phénomène de gonflement :

Le phénomène de gonflement est défini par plusieurs auteurs, la majorité dont Norrish(1954) considère qu'il se produit selon deux processus distincts : le gonflement cristallin (interparticulaire) dans le premier stade et le gonflement osmotique (interfoliaire) dans le deuxième stade.

2.1. Le Gonflement Cristallin (Interparticulaire) :

Il est dû à l'attraction entre les particules d'argiles chargées négativement en surface et la charge positive des dipôles des molécules d'eau. Sur la surface des particules d'argile, se fixe une première couche d'eau dont les extrémités négatives attirent à leur tour une seconde couche et ainsi de suite. Mais l'orientation préférentielle des premières couches d'eau autour de la particule d'argile tend à diminuer pour les couches d'eau plus lointaines, la transition entre l'eau liée et l'eau libre interstitielle étant graduelle. Ce mécanisme existe pour tous les minéraux.

2.2. Le Gonflement Interfoliaire (Intraparticulaire) :

Il résulte de l'introduction de molécules d'eau à l'intérieur des particules d'argile, entre les feuillets élémentaires. Les caractéristiques de ce gonflement dépendent essentiellement de la structure du minéral gonflant. Le gonflement devient notable lorsque l'eau peut pénétrer entre les feuillets d'argile et créer une juxtaposition de plusieurs couches monomoléculaires d'eau. Cela est le cas de la Montmorillonite qui est constituée de feuillets dont la distance interfoliaire est très variable.

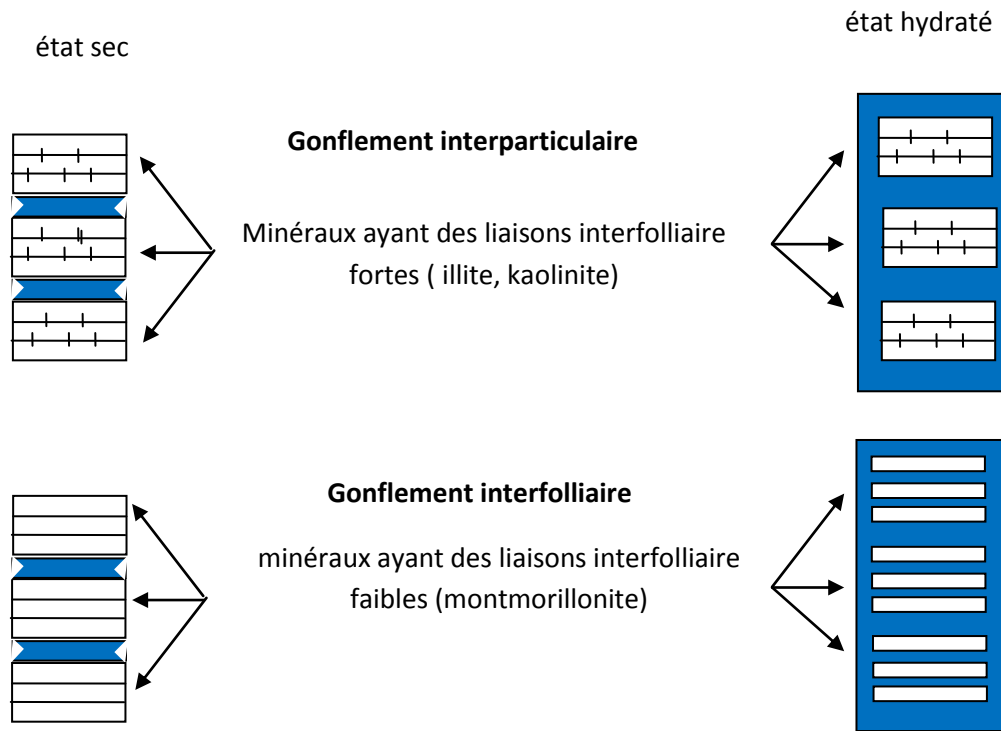


Figure II-1 : Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation

3- Mécanisme de gonflement :

Le gonflement représenté par l'extension des doubles couches entourant les particules argileuses. Les principaux facteurs régissant le gonflement des argiles peuvent être classés en deux catégories ; le sens mécanique et le sens physico-chimique (Seed et al 1961 et Mitchel, 1973) .

3.1. Le Sens mécanique de gonflement :

Le phénomène de gonflement de même que le tassement, peut provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. Il est donc important de rappeler les bases de la mécanique des sols appliquées à l'état de contrainte dans un sol.

3.1.1. Contrainte dans un sol :

Le sol est un système constitué de trois phases : une phase solide (les particules solides), une phase liquide (eau) et une phase gazeuse (bulles d'air ou film d'air continu). Le sol est saturé si la phase gazeuse disparaît, c'est à dire si tous les vides interparticulaires sont occupés par l'eau. Dans un sol saturé soumis à une contrainte totale σ , celle-ci se décompose en :

$$\sigma = \sigma' + u \text{ (Postulat de Terzaghi)}$$

Avec :

σ : contrainte totale

σ' : contrainte effective c'est la contrainte réelle qui s'exerce sur les grains solides ;

u : la pression interstitielle elle désigne la pression supportée par l'eau des pores.

Si le sol est sec, la pression interstitielle u est nulle on a $\sigma = \sigma'$

Si l'élément de sol considéré est situé sous la nappe phréatique à une zone de cote Z , la pression interstitielle est égale à la pression exercée par la colonne d'eau sus-jacente soit $u = \gamma_w \cdot z$;

D'autre part l'élément se situé au-dessus de la nappe phréatique, il peut être saturé ou non, selon les caractéristiques du matériau qui le compose et la distance qui le sépare du toit de la nappe.

L'attraction entre les molécules adjacentes à la surface d'un fluide (tension de surface) lui permet de s'élever dans un capillaire au dessus de la ligne de la pression atmosphérique. La hauteur de fluide dans le capillaire est donnée par la loi de Jurin :

$$H_{cap} = \frac{2\sigma_{cap} \cdot \cos \theta_{cap}}{\gamma_{fl} \cdot \rho_{cap}}$$

Avec :

σ_{cap} : la tension de la surface ; ρ_{cap} : le rayon capillaire, θ_{cap} : l'angle de contrainte solide/fluide et γ_{fl} : le poids volumique du fluide.

C'est ce phénomène qui permet à un sol de retenir de l'eau au-dessus du toit de la nappe par l'intermédiaire de son réseau poreux. Il est caractérisé par une pression interstitielle négative appelée succion.

Si l'élément du terrain n'est pas saturé la pression interstitielle négative est fonction de la pression d'eau u_w et de la pression d'air u_a dans le sol, Bishop (1960) a proposé une pression interstitielle équivalente u^* défini par : $u^* = u_a + \chi(u_w - u_a)$.

Ou : χ est un coefficient qui dépend du degré de saturation de sol : χ varie entre 0 et 1, et égale à 1 pour un sol saturé. (Bishop A.W, 1960).

3.1.2. Gonflement du à une modification de l'état de contrainte :

Considérons un élément de sol saturé à l'équilibre. Si une contrainte extérieure σ_e est appliqué a cet élément de sol, celle-ci immédiatement reprise par la phase liquide et au temps initial t égal à 0 on a :

$$\begin{cases} u = \sigma_e \\ \sigma' = 0 \end{cases}$$

Si on permet au sol de se drainer, un phénomène de consolidation va se développer, correspondant à l'évacuation de l'eau et au transfert de contrainte de l'eau vers le squelette solide. Un nouvel équilibre va alors s'établir pour l'état de contraintes :

$$\begin{cases} u = 0 \\ \sigma' = \sigma_e \end{cases}$$

Si la contrainte σ_e est alors supprimée, le même phénomène se produit, et immédiatement :

$$\begin{cases} u = -\sigma_e \\ \sigma' = \sigma_e \end{cases}$$

La pression interstitielle devient négative (dans le domaine des succions) et opposée à la variation de contrainte totale. Dans des conditions de libre accès de l'eau, un phénomène de gonflement va se développer, exprimant l'absorption de l'eau et le transfert de contrainte négative de l'eau vers le squelette jusqu'à l'état final :

$$\begin{cases} u = 0 \\ \sigma' = 0 \end{cases}$$

Nous déduisons que la consolidation exprime une diminution de la pression interstitielle jusqu'à son annulation alors que le gonflement exprime la diminution de la succion (-u) jusqu'à son annulation.

3.2. Le Sens Physico-chimique de gonflement :

Compte tenu de la structure minéralogique des argiles, il apparaît d'importantes interactions physico-chimiques entre certains minéraux et l'eau interstitielle.

L'approche physico-chimique est basée sur la théorie de la double couche de Gouy Chapman, 1910 (Bolt G, 1956).

3.2.1. Le modèle de la double couche :

Les particules argileuses présentent généralement une charge globalement négative due à des substitutions isomorphes au niveau des feuillets. Ce déficit de charges se traduit par la fixation de cations et par l'orientation des molécules polaires (d'eau, par exemple) dans l'espace périphérique de la particule et éventuellement entre les feuillets.

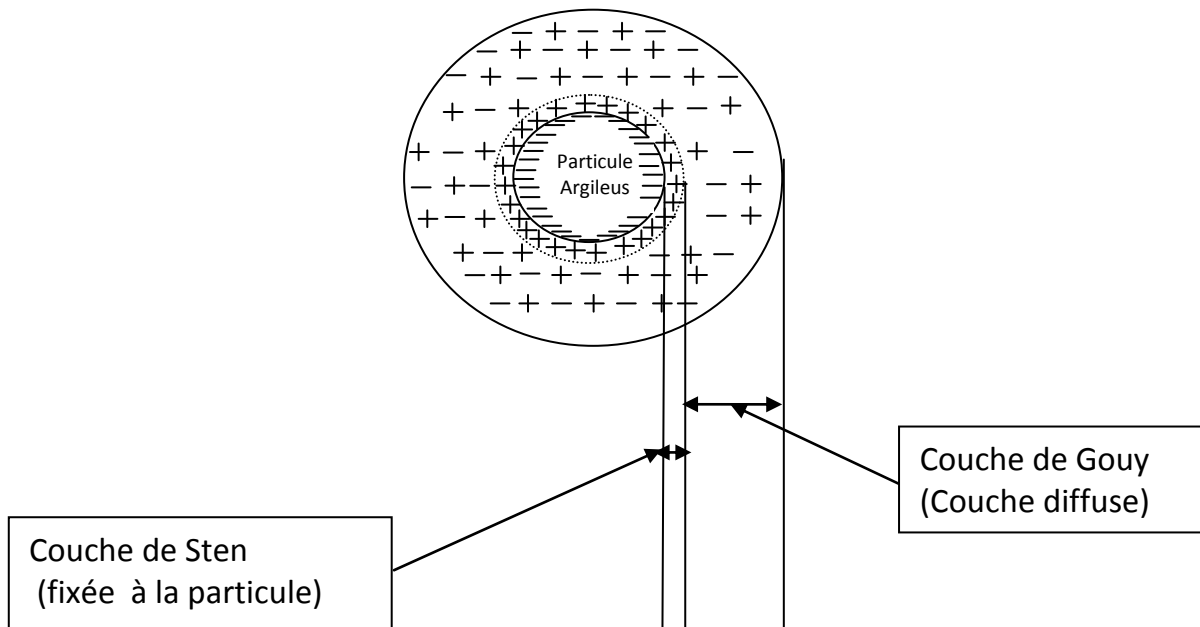


Figure II-2: Schéma de la double couche d'eau entourant une particule argileuse (Bolt G, 1956).

A l'attraction des cations par la surface des particules d'argile s'oppose la tendance des ions à diffuser et à se diffuser d'une manière homogène dans l'eau. On a aussi autour de chaque particule la formation d'une double couche électrique composée :

- D'une couche fixe liée au solide ;
- Une couche diffuse en affinité avec cette particule

La théorie de double couche nous donne les principaux résultats :

Dans un sol saturé, l'épaisseur de la double couche associée à une particule est donnée par la relation:

$$1/K = \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{liq}} k. T}{8\pi C_{\text{liq}} \cdot e^2 \cdot Z^2}}$$

Ou :

$1/K$: est l'épaisseur de la double couche en cm ;

ϵ_{liq} : la constante diélectrique du milieu liquide ;

k : la constante de Boltzmann ;

T : la température absolue en Kelevin ;

e : la charge électrique d'un électron ;

Z : la valence des cations ;

C_{liq} : concentration ionique du milieu liquide(en ions /m³).

Le gonflement représentant l'extension des doubles couches se développera en particulier avec :

- Une diminution de la concentration du liquide interstitiel C_{liq} ;
- Une diminution de la valence des ions Z .
- Une augmentation de la constante diélectrique ϵ_{liq} ;
- Une augmentation de la température T

Les études expérimentales faites par Didier et Wong ont mis en évidence l'influence notable de la salinité du liquide interstitiel sur le potentiel de gonflement des sols argileux. Ils ont, en effet, constaté que plus la concentration en sels (NaCl) est faible, plus le gonflement est important.

A partir de cette théorie de double couches, Madsen Sridharane et Jayadeva ont déterminé une relation entre la pression osmotique de répulsion P_r , le potentiel électrique U au milieu des particules (Bolt G, 1956) :

$$P_r = 2 \cdot C_{\text{liq}} K.T. (\cosh u - 1)$$

Le potentiel U dépend lui-même de la demi-distance d entre deux particules d'argile et de la valence des ions. Pour un sol dont la minéralogie et le fluide interstitiel sont connus, la pression P_r dépend de la demi-distance interparticulaire dont il est fonction strictement décroissante

3.2.2. Equilibre d'une particule argileuse dans un milieu saturé:

Considérons deux particules argileuses que l'on peut représenter comme plates et parallèles. Quand elles sont immergées, elles sont soumises, d'une part à une pression extérieure sous forme de contrainte effective σ' et aux forces électriques d'autre part (Sridharan A. et Jaydeva M.S., 1982) (voir figure II-3)

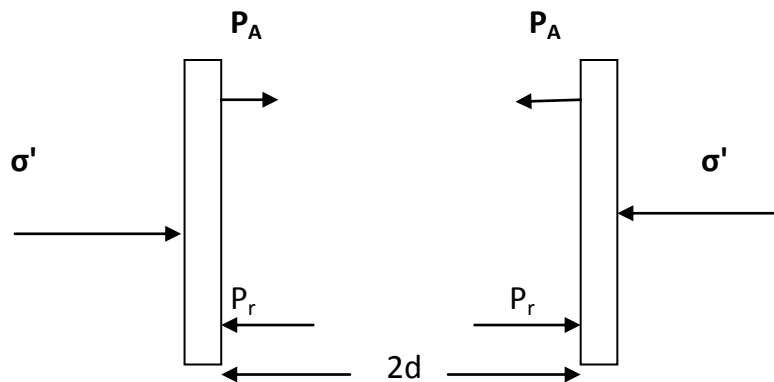


Figure II-3: Forces agissant sur deux particules d'argile

Ces sollicitations se composent de la pression osmotique de répulsion P_r et de la force surfacique d'attraction P_A de Van der Waals, qui dépend de la distance $2d$ entre les particules et décroît considérablement avec cette distance.

Pour maintenir les particules à la distance $2d$, il faut que la contrainte nette ($P_r - P_A$) équilibre la contrainte de compression σ' et donc quelle soit répulsive

Sridharan et Jaydeva ont constaté que, pour les matériaux argileux tels que la Kaolinite ou la Montmorillonite, la force d'attraction de Van der Waals était négligeable devant la pression osmotique de répulsion, pour l'intervalle de pressions mesurées habituellement en géotechnique. Dans ces conditions, le mécanisme de gonflement s'explique de la façon suivante : lorsque la contrainte effective baisse, l'équilibre ne peut être assuré que par la diminution de la pression osmotique de répulsion, c'est à dire pour une minéralogie du sol et une composition du liquide interstitielle données, par un écartement de deux particules ; ceci tend par ailleurs à diminuer légèrement la force de Van der Waals. Ainsi, une diminution de contrainte effective se traduit au niveau macroscopique par le gonflement interparticulaire des argiles.

3.2.3. Principales causes du gonflement au sens physico-chimiques

Les principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement sont:

a) HYDRATATION PAR ADSORPTION

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Il en résulte alors la formation de la double couche diffuse due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques qui sont les suivantes (Wakim J, 2005).

- **Forces d'attractions**

Généralement causées par les forces de Van Der Waals entre les feuillets voisins,

- **Forces de répulsion**

Ayant plusieurs composantes (interaction des doubles couches associées aux deux feuillets, énergie d'hydratation des cations compensateurs).

b) HYDRATATION PAR OSMOSE

Lorsqu'une solution saline est séparée de l'eau pure par une membrane semi-perméable idéale (permettant uniquement le passage des molécules d'eau mais non des substances dissoutes), l'eau pure a alors tendance à traverser la membrane pour diminuer la concentration de la solution. Ce phénomène est appelé osmose. La pression qu'il faut appliquer pour empêcher l'arrivée de l'eau dans la solution saline est nommée la pression osmotique (Wakim J, 2005). (Figure. II-4).

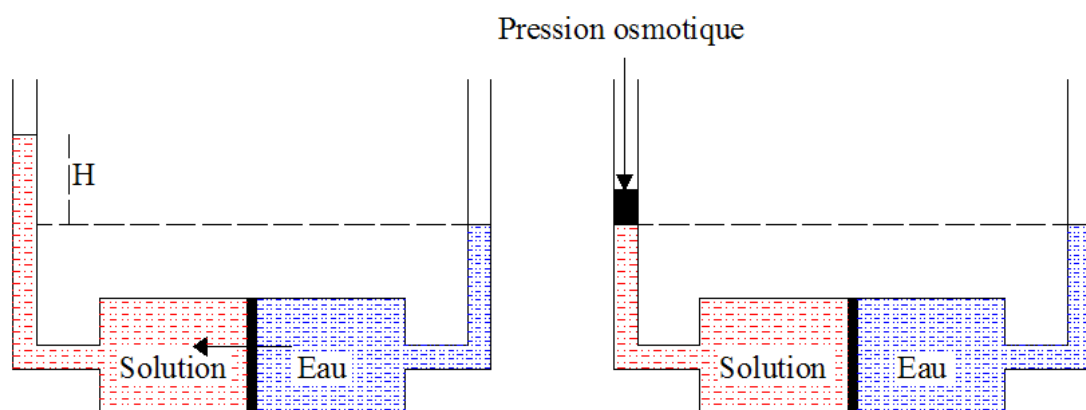


Figure II-4: Phénomène osmotique idéal cité par (Wakim J, 2005).

Si la concentration de l'eau libre est inférieure à la concentration de l'eau de la double couche, il en résulte alors une migration des molécules d'eau des pores larges vers les particules argileuses entraînant l'augmentation de la distance interfeuillet.

Au contraire, il en résulte une pression osmotique d'attraction entraînant la contraction du matériau argileux.

c) HYDRATATION PAR CAPILLARITE

La capillarité est une caractéristique des matériaux non saturés de faible porosité. Elle se traduit par une extension dans la phase liquide lors de la saturation ou par une contraction lors de la désaturation (Wakim J, 2005).

La saturation des matériaux fins après une phase de drainage peut entraîner le piégeage de l'air par l'eau à l'intérieur du réseau poreux. Ce mécanisme peut engendrer la compression de l'air responsable de la dégradation ou de la fragmentation des matériaux argileux (T.R. Harper T.R., G.L. Schmitt, T. Forsans, et J. Santarelli, E.M. Van Eeckhout. M. Brignoli et F.J. Santarelli) (Wakim J, 2005). La capillarité dépend du phénomène d'adsorption, le film d'eau adsorbé diminue l'espace poreux et modifie par la suite la capillarité.

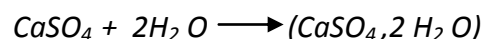
d) CHIMIQUES

Trois types de transformations chimiques se distinguent principalement (Bultel F., 2001):

- La transformation de l'anhydrite en gypse,
- L'oxydation de la pyrite,
- La dissolution des carbonates dans l'eau.

1. La transformation de l'anhydrite en gypse :

La transformation de l'anhydrite (CaSO_4) en gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se produit sous certaines conditions de pression, de température et de teneur en eau et s'accompagne d'une variation de volume spécifique (Bultel F., 2001).



Cette évolution se produit sous certaines conditions de pression, de température et de teneur en eau (Sahores, 1962). Ainsi, le sulfate de calcium sous sa forme anhydrite CaSO_4 est stable à des températures supérieures à 58°C et à une pression proche de 100 kPa. Au dessous de 38°C , l'anhydrite peut être présente si l'eau nécessaire à sa transformation est insuffisante ; seul le gypse est stable. Entre 38°C et 58°C , les deux composés coexistent et présentent des évolutions différentes.

Wittke, cité par (Bultel F., 2001) a conclu que, dans la nature, deux cas sont susceptibles de se présenter : dans un volume fermé contenant de l'anhydrite et l'eau nécessaire à la transformation, le gypse se forme avec une réduction de volume.

Par contre, si l'eau provient de l'extérieur, c'est-à-dire dans un système ouvert, théoriquement, un gonflement s'observe :

Dans la nature, les conditions sont plus proches de celles du système ouvert, c'est pourquoi on assiste généralement à un gonflement.

2. L'oxydation de la pyrite (FeS₂)

Est le processus le plus important de décomposition chimique des roches sédimentaires à granulométrie fine (Azzouz F.Z, 2006). Cette oxydation conduit à la formation de l'acide sulfurique. L'acide réagit à son tour avec les carbonates de calcium. Cette réaction produit du sulfate et peut former du gypse dont la cristallisation provoque l'éclatement du matériau argileux. (Wakim J, 2005).

L'oxydation de la pyrite peut créer un réseau de microfissures se traduisant par un risque de rupture et également des chemins préférentiels d'écoulement.

3. La dissolution des carbonates dans l'eau

La dissolution des carbonates dans l'eau rend l'argilite de plus en plus sensible à la variation de son état hydrique. A long terme, la dissolution des carbonates rend les matériaux argileux de plus en plus ductiles. (Wakim J, 2005).

4- Facteurs affectant le gonflement :

De nombreuses études ont montré que le gonflement dépend de plusieurs facteurs qu'on peut les classer en deux catégories :

- les facteurs intrinsèques,
- les facteurs externes.

4.1. Facteurs intrinsèques:

4.1.1. Compositions minéralogiques

La composition minéralogique est facteur très important dans la détermination de gonflement d'une argile. Les propriétés de gonflement d'un sol sont très marquées que le pourcentage d'éléments argileux est grand. (Holtz W.G. et Gibbs H.J., 1991).

4.1.2. Capacité d'échange en cations (CEC)

La capacité d'échange cationique (CEC) a un rôle important dans le phénomène de gonflement, car plus les feuillets possèdent des sites compensables, plus ils peuvent adsorber des ions. Cependant, lorsque la densité de sites est trop élevée, les feuillets sont liés par de trop fortes interactions pour pouvoir être échangés, et donc pour être gonflés.

Tableau II-1 : Capacités d'échange des cations de quelques argiles (Holtz W.G. et Gibbs H.J., 1991).

Argiles	CEC meq/100 g
Montmorillonite Ca ²⁺	80
Montmorillonite Na ²⁺	150
Illite	30-40
Kaolinite	3-15

4.1.3. Surface spécifique

L'augmentation de la surface spécifique entraîne la diminution de la densité en charge, et par conséquent favorise le gonflement. Les argiles dont les particules ont des surfaces spécifiques grandes sont très gonflantes. La surface spécifique s'exprime en m^2/g .

Tableau II -2 : Surfaces spécifiques de quelques minéraux argileux (Holtz W.G. et Gibbs H.J., 1991)

Argiles	Surface spécifique totale (m^2/g)
Montmorillonite	300-800
Illite	80
Kaolinite	15
Eléments non argileux	1-3

4.1.4. Densité sèche initiale du sol

De nombreuses études ont montré que la densité sèche initiale influence de façon importante la pression de gonflement. Les résultats relatifs à l'influence de la densité sur la pression de gonflement indiquent que la valeur de celle-ci augmente lorsque la densité sèche augmente.

4.1.5. Teneur en eau initiale

Lorsque les argiles ne sont pas saturées, par suite d'une dessiccation, les forces d'attraction dues aux charges électriques, les forces dérivant de l'énergie d'hydratation des cations échangeables et les forces capillaires ont la primauté.

Succinctement, plus le matériau argileux est sec, plus il a tendance à gonfler par saturation.

Pareillement, la pression de gonflement diminue avec l'augmentation de la teneur en eau initiale et cela a été vérifié sur des essais de gonflement empêché effectués sur des marnes.

4.2. Facteurs externes:

4.2.1. Conditions de compactage (statique ou dynamique)

Pour les essais de gonflement réalisés sur des échantillons reconstitués au laboratoire, l'étude de l'influence du mode de compactage a été abordée par certains chercheurs (Guirass – Skandaji.H) cité par (Azzouz F.Z, 2006). Les différentes méthodes de compactage aboutissent à des structures différentes de l'échantillon, ce qui peut influencer le résultat du gonflement.

4.2.2. Energie de compactage

A. Sridharan, Y. Gurtug, 2004 ; ont étudié l'influence de l'énergie de compactage, ils ont fait avec de la Kaolinite et l'argile de montmorillonite fortement plastique. Ils ont trouvé l'effet de cette énergie sur le taux et la pression de gonflement (Sridharan A. et Jaydeva M.S., 1982).

4.2.3. Chemin de contraintes

Le gonflement par saturation décroît lorsque la pression appliquée augmente. On arrive ainsi à la notion de pression de gonflement qui correspond à un gonflement nul.

A l'échelle microscopique, la contrainte mécanique appliquée est compensée par les pressions physico-chimiques et osmotiques interparticulaires de nature répulsive dépendant de la distance interfeuillet. Plus la pression appliquée est élevée, plus l'espacement interfeuillet est réduit. (Wakim J, 2005).

Pour une pression supérieure à la pression de gonflement, le matériau argileux a tendance à se tasser ou à s'effondrer. (Wakim J, 2005).

4.2.4. Frottement latéral

Le frottement latéral contre les parois des cellules de mesure du gonflement est non négligeable. Il dépend principalement des dimensions des éprouvettes et des conditions de mise en place des échantillons (BENGRAA L, 2004).

4.2.5. Durée des essais

La durée d'essai est aussi un facteur influant sur l'estimation du gonflement. Il a été constaté que le gonflement est rapide durant les premiers jours d'essais, puis devient de plus en plus lent, et après une semaine le phénomène se stabilise, certaines argiles nécessitent 15 jours ou plus pour atteindre la stabilisation (Azzouz F.Z, 2006).

Il existe d'autres facteurs qui ont une influence directe et indirecte sur le phénomène de gonflement d'où vient la complexité de ce phénomène.

5- Evaluation qualitative du gonflement :

5.1. Les paramètres utilisés pour évaluer le gonflement d'une argile:

Les caractéristiques physiques de l'argile peuvent être utilisées pour identifier le gonflement, les paramètres les plus utilisés sont: L'indice de plasticité, l'indice de retrait, l'activité, la surface spécifique et la Capacité d'Echange Cationique(CEC).

L'indice de plasticité I_p est défini comme étant la différence entre la limite de plasticité W_p et la limite de liquidité W_L :

$$I_p = W_p - W_L ;$$

L'**indice de retrait** I_R est défini comme la différence entre la limite de liquidité W_L et la limite de retrait (W_R) :

$$I_R = W_L - W_R$$

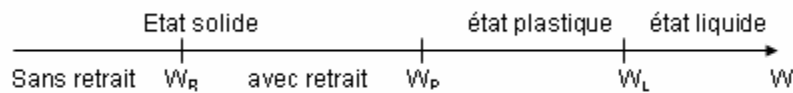


Figure II-5: La consistance d'un sol. (Bultel F., 2001).

L'**activité A** est définie comme le rapport de l'indice de plasticité I_p à la teneur en particules argileuses. Elle dépend principalement de la nature minéralogique du sol

Tableau II-3 : activités de quelques particules argileuses

Type de minéral	A
Quartz	0
Halloysite hydratée	0,1
Calcite	0,18
Muscovite	0,2
Kaolinite	0,46
Halloysite déshydratée	0,5
Elite	0,90
Montmorillonite calcique	1,5
Montmorillonite sodique	7,5

La surface spécifique est la surface cumulée de toutes les particules dans une quantité donnée de matériau. Plus les particules sont petites, plus la surface spécifique est importante. Cette quantité physique intrinsèque au matériau s'exprime en m^2/g . Il existe deux surfaces spécifiques :

- **la surface spécifique externe.** Qu'on peut l'associer au niveau interparticulaire; elle ne concerne pas la partie comprise entre les feuillets des minéraux argileux;

la surface spécifique interne, associée au niveau interfoliaire des minéraux argileux (et des phyllosilicates en général), elle est accessible à l'eau et à l'éthylène - glycol dans le cas des minéraux gonflants comme les smectites.

La valeur au bleu de méthylène (V_B) est une évaluation de la quantité et l'activité de la fraction argileuse.

L'essai au bleu de méthylène, facile et rapide à réaliser et représente un très bon indicateur du potentiel de gonflement d'un sol par la mesure de sa surface hydrophile

Une relation entre la surface spécifique totale S_p et la valeur au bleu de la phase argileuse V_B a été mise en évidence par Tran Ngoc Lan:

$$S_p = 21 V_B \times P_2$$

La capacité d'échange cationique (C.E.C) fait partie des caractéristiques les plus intéressantes à connaître pour étudier une argile ;

Le tableau (II-4) présente les valeurs des surfaces spécifiques et au bleu ainsi que de la capacité d'échange cationique de quelques minéraux.

Tableau II-4: Surfaces spécifiques, valeurs au bleu et C.E.C. de quelques minéraux argileux

Minéraux	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Surface interne (m ² /g)	0	20-55	600-700
Surface externe (m ² /g)	10-30	80-120	80
Surface totale (m ² /g)	10-30	100-175	700-800
Valeur au bleu V_B (en g de bleu/100g de sol)	1	3.6	31
Capacité d'échange (meq/100g)	3-15	10-40	70-80

5.2. Approches empiriques:

Plusieurs auteurs ont établi des approches numériques pour évaluer le gonflement des argiles, ils sont basés surtout sur les résultats des essais d'identification physique (granulométrie, détermination des limites d'Atterberg et de Retrait) (DJEDID A.).

Certains auteurs relient le potentiel de gonflement à un seul paramètre.

Tableau II-5 : Relation de potentiel de gonflement avec un seul paramètre

W_R (%)	Potentiel de gonflement
< 10	Fort
10- 12	Critique
> 12	Faible

a) Relation entre potentiel de gonflement et limite de retrait (W_R) (Altemeyer, 1955)

I_R (%)	Potentiel de gonflement
0-20	Faible
20-30	Moyen
30-60	Fort
> 60	Très fort

b) Relation entre potentiel de gonflement et indice de retrait (I_R) (Ranganatham et Satvanaravana 1965)

I_p (%)	Potentiel de gonflement
0 – 10	Faible
10- 20	Moyen
20- 35	Elevé
> 35	Très élevé

c) Relation entre potentiel de gonflement et Indice de plasticité I_p d'après Snethen (1980)

W_L (%)	Classification
0 – 20	Non gonflent
20- 35	Gonflement faible
35- 50	Gonflement moyen
50-70	Gonflement élevé
70-90	Gonflement très élevé
> 90	Gonflement critique

d) Classification de gonflement en fonction de la limite de liquidité (W_L) proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973)

D'autres auteurs proposent de relier le potentiel de gonflement à deux paramètres

Tableau II-6: Relation de potentiel de gonflement avec deux paramètres

I_p (%)	P_2 (%)	Potentiel de gonflement
>35	>95	Très élevé
22-35	60-95	Elevé
18-22	30-60	Moyen
<18	<30	Faible

a) Relation entre potentiel de gonflement avec l'indice de plasticité(I_p) et pourcentages des particules dont le diamètre est inférieur à $2 \mu m$ (P_2) d'après l'USBR

P_{74} (%)	W_L (%)	Potentiel de gonflement
>95	>60	Très élevé
60-95	40-60	Elevé
30-60	30-40	Moyen
<30	<30	Faible

b) Relation entre potentiel de gonflement avec la limite de liquidité (W_L) et pourcentages des particules dont le diamètre est inférieur à $74 \mu m$ (P_{74}) d'après Chen

Enfin, d'autres auteurs pensent qu'au moins trois paramètres sont indispensables pour pouvoir apprécier le potentiel de gonflement des sols

Tableau II-7 : Relation de potentiel de gonflement avec trois paramètres.

I_p (%)	W_R (%)	W_L (%)	Potentiel de gonflement
<18	>15	20-35	Faible
15-25	10-15	35-50	Moyen
25-35	7-12	50-70	fort

Relation entre potentiel de gonflement avec l'indice de plasticité(I_p), la limite de retrait(W_R) et limite de liquidité(W_L) d'après Holtz, Dakshanamurthy

5.3. Estimation qualitative par l'abaque de Casagrande:

Casagrande a suggéré une démarche simplifiée, basée sur les limites d'Atterberg.

L'abaque de plasticité de Casagrande peut donner autant de renseignements pertinents que les essais d'identification minéralogique.

Les argiles gonflantes se placent de façon presque parallèle sur la ligne U définie par $I_p = 0,9.(W_L - 8)$ et située au dessus de la ligne A définie par $I_p = 0.73.(W_L - 20)$.

Cependant une argile appartenant à la bande déterminée par ces deux droites peut ne pas être gonflante puisque des sols mous peuvent par fois s'y placer. Les dénominations dépendent de la position dans le diagramme: Argile au dessus de la ligne A Limons en dessous ; peu plastiques si $W_L < 50$; très plastiques si $W_L > 50$

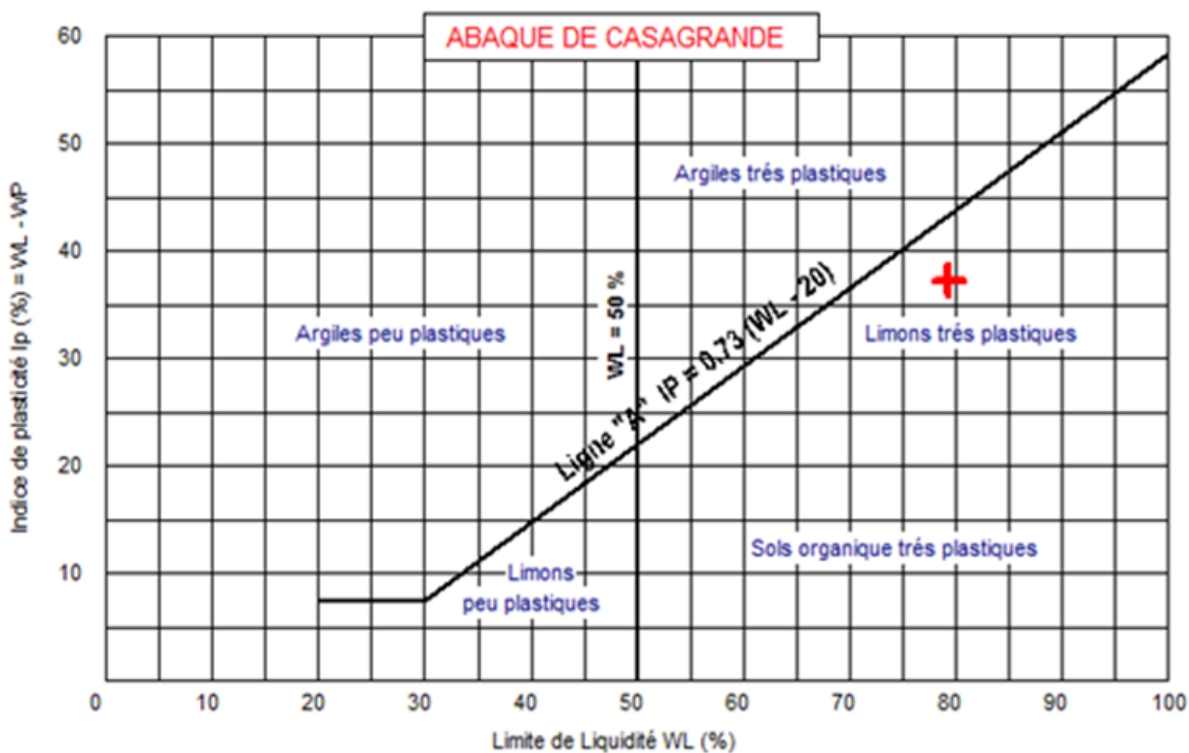


Figure II-6: Diagramme de Casagrande .

6- Estimation quantitative par des corrélations:

Il est possible d'estimer les paramètres de gonflement (pression et taux de gonflement) à partir de nombreuses corrélations proposées par les auteurs sous forme d'expression empiriques.

Ces expressions mettent en relation les paramètres de gonflement avec les caractéristiques physiques du sol déterminées à partir des essais de laboratoire.

Il est important de signaler que les résultats de ces corrélations ne sont pas exacts et ne peuvent pas utiliser que pour des reconnaissances préliminaires.

6.1. Pression de gonflement:

David et Komornik ont tiré une relation qui permet d'estimer la pression de gonflement en fonction de la limite de liquidité, la teneur en eau naturelle et le poids volumique sec du sol. :

$$\text{Log}(P_g) = 2,08.W_L + 0,006688 \gamma_d - 2,69 W + 0,132$$

Avec :

La pression de gonflement P_g est donnée en kPa ; la limite de liquidité W_L et la teneur en eau naturelle W sont en chiffre décimal tandis que le poids volumique sec γ_d est en kN/m^3

En se basant sur les résultats de 270 essais de gonflement réalisés sur divers sols, Vijayvergiya et Ghazzaly ont proposé deux modèles qui permettent d'obtenir la pression de gonflement.

$$\text{Log}(P_g) = -(0.4 W_L - W + 23.6)$$

$$\text{Log}(P_g) = \frac{1}{19.5} (6.24 \gamma_d + 0.65 W_L - 100)$$

Dans ces modèles, la pression de gonflement P_g est donnée en kPa ; le poids volumique sec est en kN/m^3 , la limite de liquidité W_L et la teneur en eau naturelle W sont en chiffre décimal.

6.2. Amplitude de gonflement:

Pour l'amplitude de gonflement, les modèles donnent généralement le gonflement libre. Pour des sols contenant entre 8 et 65 % d'argile, Seed et al. proposent une relation entre le taux de gonflement ε_g et l'indice de plasticité I_p .

Le taux de gonflement est défini comme étant le pourcentage de gonflement d'un échantillon d'argile compacté à l'optimum Proctor et soumis à une charge de 7 kPa. Ce taux de gonflement est donné par la relation suivante :

$$\varepsilon_g = 10^{-5} \cdot I_p^{2.24}$$

Le modèle proposé par O'Neil et Ghazzaly s'écrit :

$$\varepsilon_g = 2.77 + 0.113 w_L - 0.27w$$

Tandis que le modèle proposé par Johnson et Snethen s'écrit :

$$\log \varepsilon_g = 0.36 w_L - 0.0833w + 0.458$$

Dans les relations précédentes, ε_g est le gonflement libre en pourcents ; W_L et W s'expriment en chiffre décimal pour la première relation et en pourcents pour la seconde.

Sur la base de 270 essais de gonflement, Vijayvergiya et Ghazzaly ont établi les corrélations suivantes :

$$\log \varepsilon_g = \frac{1}{12} (0.4w_L - w + 5.5)$$

$$\log \varepsilon_g = \frac{1}{19.5} (6.24 \gamma_d 0.65w_L - 130.5)$$

Où γ_d est en kN/m³ et ε en pourcent, w_L et w sont en chiffre décimal pour la première et en pourcent pour la seconde.

Le gonflement libre, obtenu à partir des modèles ci-dessus, peut être réduit dans le cas où le sol serait soumis à une pression de confinement σ_v à l'aide de la formule suivante proposée par Gogoll:

$$\varepsilon'_g = \varepsilon_g (1 - 0.735\sqrt{\sigma_v})$$

Où σ_v est la contrainte de confinement exprimée en kPa.

7- Méthodes directes de mesure du gonflement:

7.1. Essais de gonflement au laboratoire:

De nombreuses méthodes ont été utilisées pour évaluer le phénomène de gonflement, elles se distinguent par la modalité de chargement (charge constante, charge variable et chargement par palier..etc).

Historiquement, c'est à l'aide d'oedomètre que les premiers essais ont été réalisés. Cet appareillage est bien adapté à la mesure d'une variation de volume et offre un moyen direct de suivi de gonflement lors de la mise en imbibition de l'éprouvette.

Les procédures d'essais les plus connues peuvent être classées en quatre catégories :

7.1.1. L'essai œdométrique :

Après montage dans la bague œdométrique l'éprouvette est soumise à l'imbibition sous le poids du piston (Jennings et Knight 1957 ; Jennings et al., 1973). Après stabilisation de gonflement, le chargement s'effectue par palier selon un taux de chargement approprié jusqu'à stabilisation des déformations sous chaque palier. La pression de gonflement correspond à la charge qu'il est nécessaire d'appliquer pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale. Dans le cas des sols moyennement à fortement gonflants, cette procédure peut entraîner une modification de leur structure pendant le gonflement avant le retour à une déformation nulle (Serratrice J.F., 1996).

7.1.2. Avec la procédure de Huder et Amberg (Huder et Amberg, 1970 ; Wittke, 1979) :

L'éprouvette de sol est placée dans son état naturel à l'intérieur d'une bague oedométrique flottant entre deux pierres poreuses. Un premier chargement est appliqué en quatre à cinq paliers, l'éprouvette conservée dans son état naturel jusqu'à une contrainte axiale σ_A (chemin 1) pour effacer les effets du remaniement dû au prélèvement du sol et à sa mise en place à l'oedomètre. L'éprouvette est soumise à un cycle de déchargement-rechargement jusqu'à la contrainte σ_A (chemin 2 et 3) et dans les mêmes conditions. Elle est alors mise en présence d'eau sous cette contrainte par immersion complète dans la cellule oedométrique et le gonflement ou (effondrement) commence (chemin 4). Plusieurs semaines, voire plusieurs mois, peuvent s'écouler avant la stabilisation du gonflement du sol. Ce stade étant dépassé, l'éprouvette est déchargée au palier précédent et son gonflement est observé jusqu'à stabilisation, avant de procéder à un nouveau déchargement, d'où le chemin 5. L'intersection des chemins 3 (rechargement à l'état naturel) et 5 (déchargement sous imbibition), si elle existe, après un effondrement sous σ_A , pour abscisse la pression de gonflement σ_g .

Lorsque la capacité de l'appareillage ne suffit pas à franchir la pression de gonflement, l'intersection est obtenue par extrapolation en prolongeant les chemins 3 et 5.

Cette technique présente l'avantage, dans le cas de sols indurés, hétérogènes ou fissurés, de n'employer qu'une seule éprouvette. Si l'on admet de pouvoir comparer les chemins 3 et 5, la différence entre ces deux branches des courbes contrainte-déformation représente le potentiel de gonflement du sol. Ce n'est plus vrai dans le cas d'une évolution de la structure du matériau pendant l'essai, ou la progression du gonflement sous une charge donnée dépend, en partie, du déroulement du gonflement pendant les paliers précédents (Serratrice J.F., 1996).

7.1.3. Essais de gonflement en parallèle :

Cette méthode est utilisée pour éviter les inconvénients de la méthode précédente, elle consiste à placer plusieurs éprouvettes d'un même matériau dans différentes cellules oedométriques. Chaque éprouvette est chargée dans son état naturel jusqu'à une contrainte axiale convenablement choisie suivant un taux d'accroissement des charges préalablement définie. Le gonflement ou l'effondrement de chaque éprouvette est initialisé par imbibition sous contrainte et jusqu'à stabilisation. Cette technique, qui généralise la procédure de Holtz et Gibbs (1956), présente l'inconvénient d'avoir à tester simultanément plusieurs éprouvettes de matériau parfois hétérogène. Elle est principalement utilisée dans les cas des matériaux compactés, pour lesquels il est plus facile de préparer des éprouvettes identiques. Mieussens (1993) a proposé une procédure d'essai de gonflement-effondrement pour évaluer la qualité de matériaux compactés. Après stabilisation des déformations, on compare entre elles et les déformations résultant, d'une part, du chargement et, d'autre part, de l'imbibition en fonction de la contrainte axiale, ce qui donne directement le potentiel de gonflement du sol testé. Cette méthode présente l'avantage de soumettre ou le sol ou la roche à des conditions

proches de la réalité, chaque éprouvette pouvant représenter différent élément du massif ou du remblai (Serratrice J.F., 1996).

7.1.4. Méthode de gonflement à volume constant :

Elle consiste à imbiber l'éprouvette sous une charge donnée, puis à la charger par petits paliers successifs de façon à maintenir au milieu sa hauteur à une valeur constante. De nombreux auteurs ont utilisé cette méthode (Sullivant et Mc Celland, 1969). Dans ces conditions, la structure du sol est supposée ne pas trop évoluer pendant l'essai, contrairement à ce qui se passe avec la procédure de gonflement libre. Cette méthode a été fortement décriée car elle est délicate à mettre en œuvre (l'essai doit impérativement se dérouler par accroissement continu du chargement jusqu'à atteindre l'équilibre à la pression de gonflement), le matériel devant posséder une forte rigidité et le rattrapage de gonflement par des poids supplémentaires induisant de petites oscillations, assimilables à des cycles de chargement-déchargement (Serratrice J.F., 1996).

7.2. Essais de gonflement in situ:

7.2.1. Mesure de l'amplitude de gonflement

La mesure de l'amplitude de gonflement est possible in situ, mais elle est souvent très longue et nécessite plusieurs mois de lecture. Cette mesure à la surface d'un sol peut être réalisée par simple contrôle topographique autour d'un jalon gradué planté très profondément.

On peut aussi utiliser un Expanso-collapsomètre : c'est un appareil qui permet d'adapter un essai de plaque à la mesure du gonflement; un dispositif d'humidification est mis en place sous la plaque.

7.2.2. Mesure de la pression de gonflement

Les essais géotechniques in situ classiques (pénétromètre, pressiomètre) sont impuissants pour déceler et étudier ce genre de problème. Le temps relativement long de développement du gonflement dans les sols explique en partie le faible nombre d'essais in situ, car la réalisation d'essais mobilisant des équipes et du matériel pendant des durées importantes ne saurait être envisagée.

Dans le cadre de la recherche, on peut instrumenter un puits en plaçant un anneau de mesure muni de capteurs d'effort et d'extensomètres et en enregistrant l'évolution de la pression de gonflement après saturation du puits

Flavigny et Al ont développé un dispositif pressiométrique conçu pour opérer à faible profondeur dans des conditions habituelles d'essais. Il s'agit de deux sondes pressiométriques superposées reliées chacune à un système de mise en pression entre lesquelles se trouve un dispositif d'humidification. La sonde supérieure est dévolue aux essais pressiométriques normaux tandis que la sonde inférieure permet pendant l'humidification de réaliser un essai de gonflement libre ou de gonflement à volume constant

8- Evolution du gonflement:

Le gonflement des sols argileux est un phénomène très lent du fait de la faible perméabilité des argiles et de la diminution continue du gradient en fonction du temps qui tend à drainer l'eau dans le sol.

8.1. Evolution du gonflement en fonction du temps:

L'évolution du gonflement avec le temps est liée d'une part, à la répartition du gonflement interparticulaire et du gonflement interfoliaire et d'autre part, à l'évolution de l'hydratation.

Le gonflement interparticulaire étant une réaction pseudo-élastique au déchargement, sa réaction est lente et peut durer plusieurs années, même lorsque la succion est complètement annulée.

Le gonflement interfoliaire est beaucoup plus rapide et aurait tendance à se stabiliser assez vite, après quelques saisons voir quelques mois seulement.

L'évolution de l'hydratation qui gouverne les deux phénomènes est souvent très lente et progresse de façon plus ou moins continue, en particulier sous un bâtiment où elle alimente en permanence le gonflement interfoliaire. En conséquence, dans des cas similaires, il faudrait 5 à 10 ans pour voir se stabiliser les mouvements de gonflement au centre d'un bâtiment (Mouroux, 1989).

Les courbes d'évolution du gonflement en fonction du temps obtenues au laboratoire sont similaires à celles de la consolidation

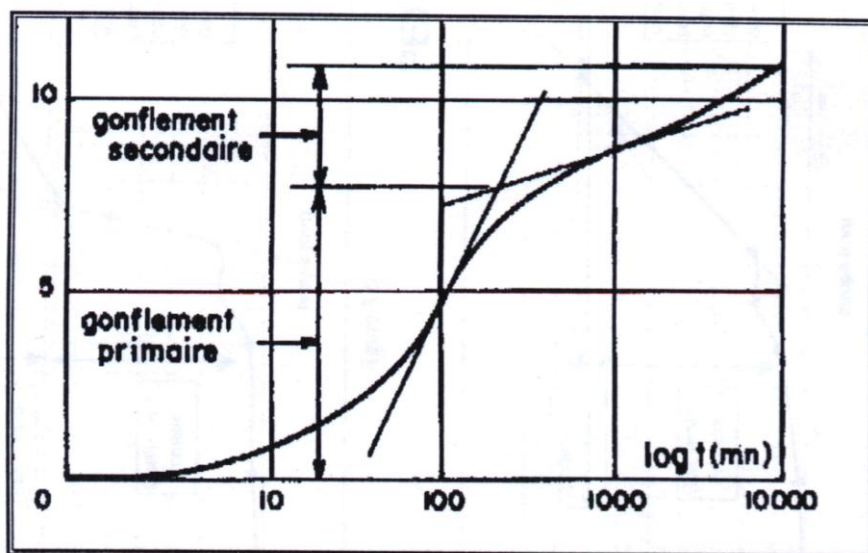


Figure II-7 : Courbe de gonflement en fonction du temps.(Chen.1988).

8.2. Cinétique du gonflement:

Le sol présente une structure plus ou moins discontinue qui dépend des sollicitations passées. L'absorption de l'eau est reliée à cette structure donc elle ne peut être homogène. En partant de points bien localisés et en engendrant des fissurations entre les particules, le sol finit par l'hydratation totale

A partir de ce mécanisme d'hydratation, résulte une cinétique du gonflement assez longue. Pour l'étude de ce phénomène, on peut utiliser la cellule oedométrique pour mesurer le gonflement unidimensionnel en fonction du temps. Il faut noter que pour des faibles charges, la cinétique du gonflement peut durer plusieurs années pour atteindre la stabilisation.

Les procédures de mesure du gonflement ne peuvent nullement être généralisées. Le procédé dépend étroitement des critères de fiabilité et d'économie.

Dans une première étape, une hiérarchisation de ces procédures a permis de présenter et de définir l'ensemble des cas qui peuvent se présenter tenant compte des besoins des études.

En second lieu et afin de s'intéresser à l'évolution du gonflement en fonction du temps, par analogie aux paramètres de consolidation, il a été proposé deux coefficients (G_p) et (G_s) caractérisant respectivement le gonflement primaire et le gonflement secondaire.

En dernière étape et dans un souci d'enrichissement des procédures de mesure du gonflement, il a été introduit l'étude de la cinétique du gonflement qui a permis une bonne approximation du taux de gonflement final.

PARTIE EXPÉRIMENTALE

INTRODUCTION

Nous avons vu dans les chapitres précédents que le phénomène de gonflement est influencé par plusieurs paramètres intrinsèques ou externes, l'objectif du présent travail est de contribuer à l'étude de l'influence de l'un de ces paramètres ; la nature d'eau d'hydratation.

La philosophie du présent travail est de faire une étude de gonflement d'argile en utilisant différents types d'eau existant dans la nature, afin de vérifier l'influence de ces derniers sur les paramètres de ce phénomène assez complexe.

L'avis des spécialistes dans la région de sud algérien, complété par la consultation de plusieurs sujets de recherche, nous a orientés vers le choix des argiles de la région d'In Amenas et celles d'In Salah comme exemples pratiques pour notre étude expérimentale.

Ces deux types d'argile sont très connus par leurs potentiels de gonflement, ils sont l'origine de plusieurs dégâts dans le domaine de la construction.

Chapitre III : Présentation des zones d'étude

1. Introduction :

Les argiles choisies pour faire l'étude expérimentale du présent travail sont celles de la région d'In Amans et d'In Salah, ces deux régions du sud algérienne sont caractérisées par la présence des argiles à fort potentiel de gonflement, elles ont fait l'objet de plusieurs sujet de recherche

2. Région d'In Amenas :

2.2. Situation géographique :

La ville d'In Amenas, chef lieu de la Daïra, se situe à 240 Km au Nord d'Illizi (chef lieu de Wilaya), à 800km au Sud-Est de la Ville de Ouargla et à 1600 km au Sud-Est de la Capital (Alger).

Son altitude est d'environ 540m par rapport au niveau de la mer elle se trouve entre les longitudes : 28°00' et 28° 04' et les altitudes : 9° 30' et 9° 40'

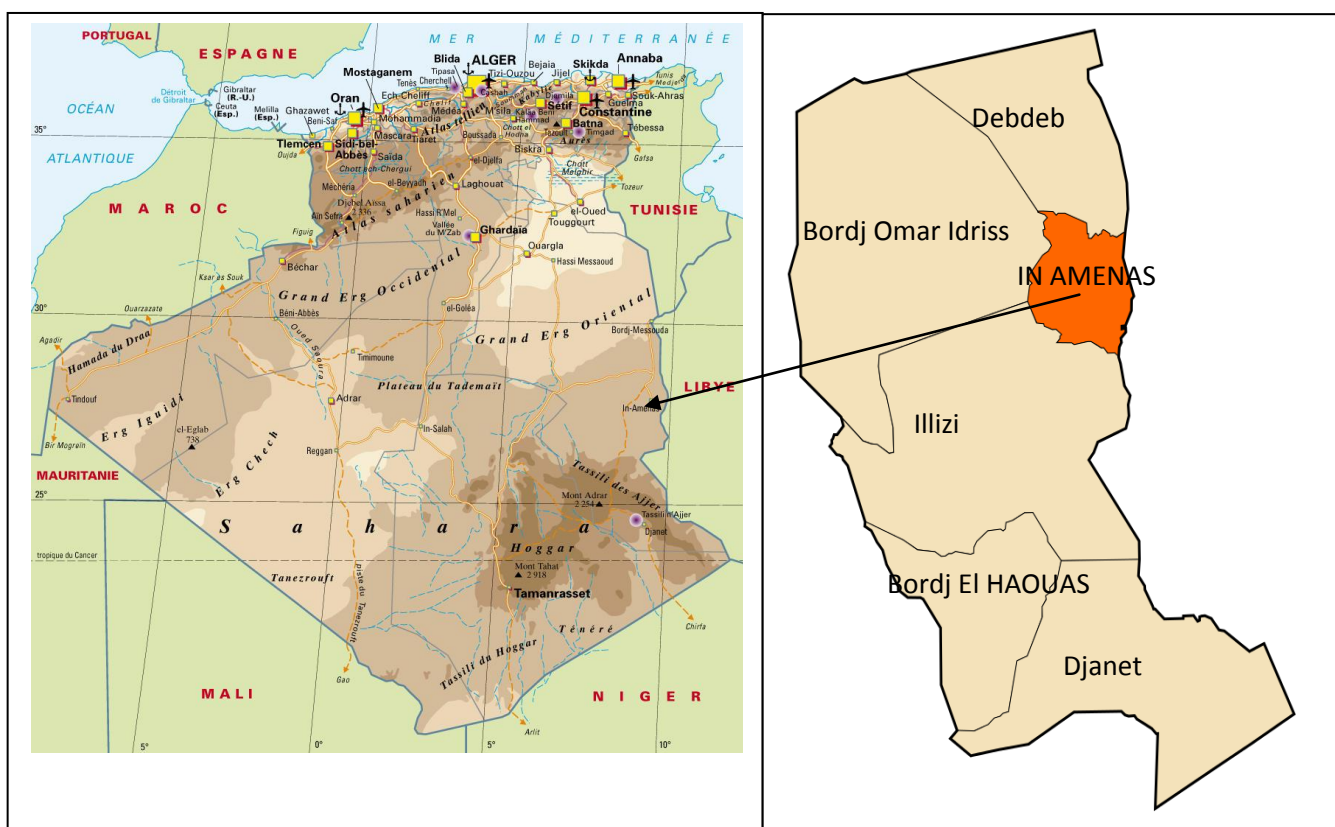


Figure III-1: Situation géographique de la ville d'In Amenas

2.2. Contexte Géologique

2.2.1. Géologie régionale

La zone d'In Amenas fait partie du bassin d'illizi qui appartient géographiquement au Sahara oriental.

Le bassin d'illizi couvrant plus de 100 000 Km² s'étend entre les latitudes 26°30' et 29°45' et les longitudes 6° et 10°, il est limité au Nord par le plateau de Tinrhert et la dépression de Ghadames ; au Sud par le Tassili N'Ajjer ; à l'Est par le môle de Tikhemboka et à l'Ouest par l'axe Amguid- El Biod.

Les données géologiques locales montrent que la formation principale rencontrée dans la région appartient à la série des argiles triasiques; région qui renferme les plus importants gisements pétroliers du Sahara. Des sondages pétroliers ont montré que cette formation d'argile a une puissance supérieure à 180 m et surmonte la formation carbonifère.

Les multiples études de sols réalisées dans la région ont révélé la présence d'un sol composé essentiellement d'argile rouge bariolée (mauve, jaune, vert et bleu), très compacte, couverte en surface par une couche altérée. Cette couche d'altération est le produit de l'action conjuguée du soleil, de la pluie et des vents de sable. Ces phénomènes thermoclastiques sont à la base des fractures subverticales repliés de sable existant dans le sous-sol. Le vent apporte du sable qui est entraîné par les faibles pluies dans les fissures qu'il colmate.

2.2.2. Stratigraphie

De nombreuses études de sol ont été effectuées sur les sols d'In-Amenas pour le compte de compagnies nationales implantées dans la région. Ces études ont été réalisées par des laboratoires nationaux et étrangers dans le cadre de conception d'ouvrages ou dans le cadre d'expertises. La synthèse de ces études montre que les argiles de la région se présentent suivant une stratigraphie assez régulière et globalement homogène selon cinq (5) couches :

- Une couverture sableuse ou couche d'altération de quelques centimètres à quelques décimètres par endroits.

- Un horizon supérieur constitué de matériau limono- argileux de couleur rougeâtre. Cet horizon épais de 1.5 m en moyenne contient des mud-cracks. Par endroits ce matériau présente une couleur violette. L'homogénéité de cet horizon en plan est interrompue seulement par de légères variations latérales. Il se présente par endroits plus riches en altérations jaunâtres et en argile.

- Un horizon argileux compact presque dépourvu de fractions sableuses. Cet horizon de couleur rougeâtre est légèrement plus sombre que la couche supérieure. Dans les tranchées, ce matériau se présente en petits blocs compacts séparés les uns des autres par de nombreuses fractures dans les faces, ce qui témoigne de la grande sur-consolidation de cette argile. On trouve dans cet horizon de la litho types bariolés de vert clair parfois argileux

parfois sableux se présentant sous forme de lentilles éparpillées ou en noyaux concentrés ou en étages discontinus.

- Un étage argileux verdâtre relativement mince qui apparaît dans les tranchées à une profondeur de 3 à 4 mètres pas toujours bien délimité aux bords.

- Un horizon inférieur constitué d'argile limono- sableuse rougeâtre identique à l'horizon argileux compact mais visiblement moins compact et plus fracturé

2.2.3. Hydrogéologie :

Les ressources en eaux sous terrain de la zone d'In Amenas se localisent dans les deux nappes suivantes :

- **Nappe carbonifère** : utilisée pour les besoins industrielles de la région. Elle est caractérisée par une qualité médiocre (salinité supérieure à 20 g/l) ;
- **Nappe Série Zarzaitine** : captée par des forages à des profondeurs variant de 250 à 400 m, son réservoir est caractérisé par des sables et des sables argileux avec des niveaux gréseux, la qualité des eaux est relativement bonne.

2.3. Climatologie

Le climat de la région d'In-Amenas se caractérise par une longue saison estivale sèche et chaude, et une saison hivernale douce et de faible pluviométrie.

2.3.1. Précipitations

La moyenne des précipitations annuelles déterminée par la station d'In-Amenas pour la période 1975-1984 est de 29 mm/an. Dans cette région la notion de moyenne ne reflète guère la réalité à cause de la très grande variabilité de la quantité de pluie (Tableau II-1).

Les pluies tombent pendant 14 jours en moyenne pendant la période hivernale.

Tableau III-1 : Moyennes des précipitations mensuelles relevées à In-Aménas (1975-1984).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Précipitations(mm)	1.9	2.6	4.5	0.1	3.4	3.2	0.0	0.0	1.9	3.8	3.1	4.4

2.3.2. Températures

Les températures moyennes sont comprises entre 10 °C et 32 °C. La grande différence entre les températures moyennes de l'été et celles de l'hiver montre l'importance de la chaleur estivale.

2.3.3. Evaporation

L'évaporation est très élevée, avec un total annuel dépassant les 4.5 m.

2.3.4. Vents

Les vents au sud sont généralement secs et froids en hiver et deviennent chauds et desséchants en été (Sirocco).

On estime que le Sirocco sévit pendant environ 15 jours/an créant des vents de sable.

Les vents font baisser le degré d'humidité jusqu'à 2%.

2.3.5. Ensoleillement

L'ensoleillement est relativement élevé. Elle est par conséquent favorable à une activité photosynthétique optimale.

2.3.6. Végétation

La végétation de région est très éparse et est de nature basse. Elle est constituée de groupements végétaux, du type steppique, azonaux et de peu d'espèces.

3. Région d'In Salah :

3.1. Situation géographique :

La ville de In Salah, chef de lieu de la daïra, se situe à 670 Km au Nord de son chef lieu de Wilaya, Tamanrasset, elle est à 800 Km au Sud de Ouargla et à 1300 Km au Sud de la capital (Alger).

In Salah se trouve à environ 268 m par rapport au niveau de la mer elle se situe entre les longitudes : 27°08' et 27° 18'' et les altitudes : 2° 22' et 2° 36'

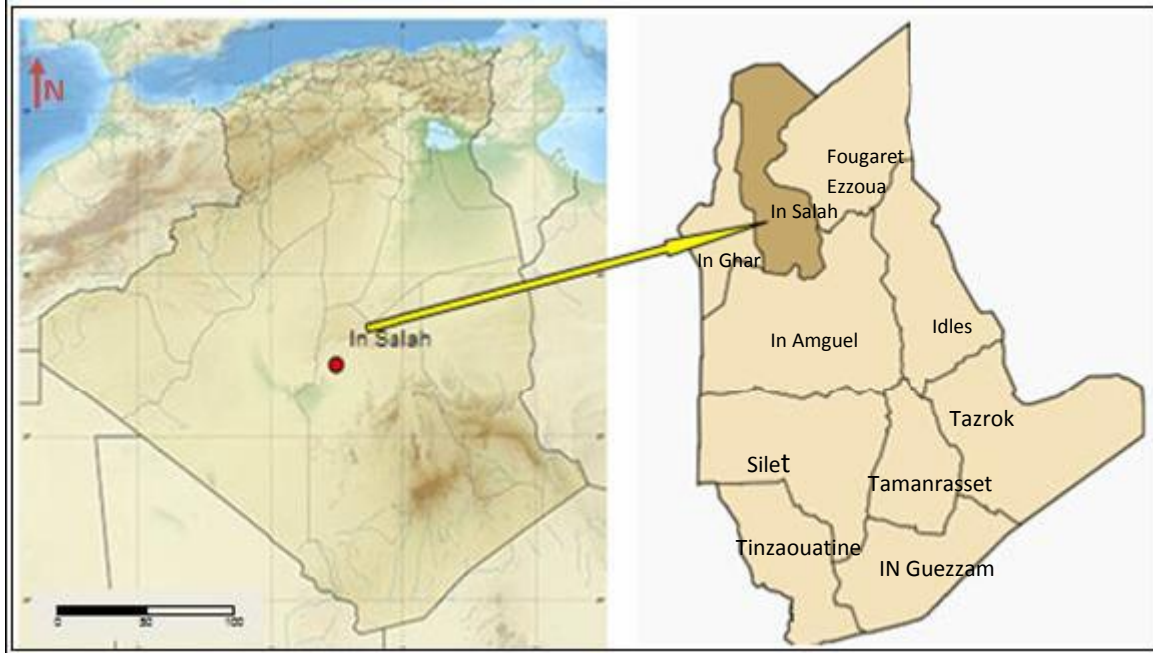


Figure III-2: Situation géographique de la ville d'In Salah

3.2. Contexte Géologique

3.2.1. La Structure Géomorphologique

La région d'In Salah constitue la limite sud du grand plateau de Tidikelt. Elle est caractérisée par deux traits morphologiques.

✓ **le plateau (Reg)** est une vaste plaine allongée sensiblement NE – SW, limitée au sud par les affleurements du primaire et au nord par les falaises des formations du crétacé supérieur. Les altitudes du plateau sont limitées par la courbe de niveau 275 et 300 m.

La pente est généralement très faible, elle est de l'ordre de 1% et le pendage est vers le Sud Ouest.

✓ **La dépression** qui marque la limite sud ouest du plateau de Tidikelt caractérise l'extrémité occidentale des palmeraies, et les sebkhas qui sont des successions de petites sebkhas qui marquent la limite sud du bassin occidental (zone Tidikelt) et constituant l'exutoire naturel des eaux de la nappe aquifère.

3.2.2. La Géologie régionale :

La zone d'étude est intégrée dans l'ensemble de la plateforme saharienne, cette dernière est relativement stable (peu déformée) et caractérisée par la présence des terrains primaires qui sont affectée par des plissements, ils sont surmontés par les séries du continental intercalaire (crétacé supérieure) se terminant par des formations du tertiaire continental.

La couverture de la plateforme saharienne est constituée par le Protérozoïque supérieur ou l'Infracambrien, le paléozoïque et le mésozoïque.

La zone est située au Nord du bassin de l'Ahnet, ce dernier s'est formé pendant le Silurien, mais son évolution s'est transformée en un élément tectonique indépendant, puis s'est poursuivie jusqu'à la fin du Paléozoïque où cette dépression a été bien structurée et individualisée.

Il existe une importante érosion des séries paléozoïque qui se trouvaient dans une position haute. La discordance hercynienne matérialise cette surface d'érosion et sépare ainsi les séries paléozoïques de séries mésozoïques.

Sur la majeure partie du bassin de l'Ahnet, la couverture sédimentaire est représentée par les séries paléozoïques. La sédimentation essentiellement détritique est liée à des environnements très variés (continentale, glaciaire, marin et marin littoral).

Au mésozoïque, elle est surtout continentale et marine (Mézine, 1992).

3.2.3. la Stratigraphie:

On se basant sur la carte géologique d'In Salah et les informations fournies par les forages pétroliers ; le log litho stratigraphique des formations géologiques rencontrés dans la région d'In Salah est le suivant :

a) Paléozoïque :

Les sédiments du paléozoïque sont largement développés dans le Sahara. Mais dans la zone de In Salah on remarque que le paléozoïque est profond et moins affleurant par rapport à d'autres régions au sud de In Salah et aux terrains du bassin de l'Ahnet et cela est du à l'élargissement du continental intercalaire.

b) Dévonien :**1- Dévonien inférieur :**

Il est généralement constitué par des argiles gréseuses avec des passages de grés au sommet (zone de passage). La radioactivité à la base de ces argiles constitue un bon repère diagraphique, donc la succession de bas en haut des formations se présente comme suit :

- L'ensemble argilo-gréseux, il est formé par des argiles plus ou moins silteuses et micacées, des grés fins à très fin ;
- Essentiellement quartzique ou siliceux quartzique compacte.
- Constituée à la base par des argiles silteuse et au sommet par un banc de grés propre, fin et moyen (réservoir hydrocarbure).

2- Dévonien moyen :

Moins épais que l'inférieur et dominé par les faciès marins, composé de bas en haut par :

- Des argiles carbonatées et marnes avec des passages de calcaire et de grés.
- Calcaire compacte et passées d'argile.

3- Dévonien supérieure :

Formé par Frasnien, Famennien et Strunien. Il est caractérisé essentiellement par la présence d'argile schisteuse et argiles versicolores dans tous les niveaux.

- A la base, on trouve des argiles schisteuses riches en matière organique surmontées par des argiles gréseuse, quelque gravier et gypses.
- Au milieu, il ya un ensemble gréseux à stratification variée, avec un mélange de gravier ou d'argile et gypse.

c) Carbonifère

Le Carbonifère correspond au cycle sédimentaire paléozoïque final. On peut l'observer dans les domaines occidentaux et orientaux, séparés par le môle d'Amguid-El Biod Messaoud, d'où les dépôts sont absents. Les faciès varient, de marin profond jusqu'à continental.

De même, les épaisseurs varient de 900m à l'est pour atteindre 2800m à l'ouest, en général les forages d'eau montrent que cet âge est constitué essentiellement par des formations imperméables argileuse avec intercalations des faciès gréseux. Donc :

- A la base ; on remarque les passages argilo-gréseux plus ou moins épais
- Au milieu, on observe quelques blocs de calcaires associés avec les argiles, graviers fins et gypses

- les sommets sont formés par des grés fins, sables fins, gyps, des poches continentales et argiles plastiques.

d) le mésozoïque :

Discordant sur le Paléozoïque, il est représenté par les dépôts salifères du Trias et argilo-gréseux du Crétacé. Le Mésozoïque est développé dans les zones les plus déprimées des bassins sahariens, principalement dans le Sahara septentrional.

e) Crétacés inférieur (continentale intercalaire) :

Il est partout transgressif et discordant sur la série du paléozoïque. Il est épais de 1620 m de la base au sommet

Le continental intercalaire est épais et large à cause de son affleurement important sur le paléozoïque.

En géologie, le continentale intercalaire désigne les formations continentales qui sont déposées entre le cycle marin du paléozoïque clôt par l'orogénèse hercynienne et la transgression marine du cénomanién. Elle couvre une large période du trias à l'Albien.

Les logs des forages d'exploitation et de reconnaissance montrent que le continentale intercalaire dans la zone d'étude est constitué, de la base au sommet, par les formations suivant :

- Une série d'épaisseur variant de 20 à 90m. Elle est constituée par des Sables fin argileux.
- Des séries de grés à gravier fin parfois siliceux, et des intercalations d'argiles gréseuses, avec une épaisseur variant de 15 à 150m.
- Une série de 20 à 200 m d'argiles rouges parfois presseuses ou légèrement sableuses, avec la présence de minces niveaux de calcaire dur.
- Mélange épais 30 à 120m des formations gréseuses avec le gravier moyen et des intercalaires de (calcaire siliceux ou quartzique durs, gravier fin siliceux sable grossier et grés argileux).
- Des bancs gréseux durs à très durs de 5 à 150 m épaisseurs avec des sables siliceux et argiles limoneuses.

f) Crétacés supérieure :

1 - Cénomanién:

Le Cénomanién constitue la couverture sédimentaire du continental intercalaire. Il est constitué par la dolomie finement cristallisée et argile plastique brun et rouge.

2- Turonien:

D'épaisseur variant de 70 à 120 m, il est formé d'alternance de calcaires dolomitiques et crayeux.

3- Sénonien:

Épais de 465 m il s'agit d'une sédimentation marno-calcaire. Il est constitué par :

Sénonien supérieur : Calcaire, calcaire à silex et argile.

Sénonien inférieur : Argile à gypse, calcaire à silex rubané et grés.

g) quaternaire :

Le quaternaire est le résultat de la destruction des roches par les phénomènes naturels (érosion – l'écoulement à cause de la température). Il est caractérisé essentiellement par des Alluvions argileux sableuse. Les dépôts du Quaternaire sont formés de couches de sables d'épaisseurs de 0 à 20 m.

3.2.4. hydrogéologie:

La région d'In Salah est située à la limite sud du Bassin occidental du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) dans les affleurements du Continental Intercalaire (CI)

La région est caractérisée par une série d'oasis alimentées anciennement par des foggaras et depuis le début du 20ème siècle, par des forages artésiens jaillissants. Le cartésianisme ayant diminué, la plupart des forages sont aujourd'hui exploités par pompage.

3.3. Climatologie :

La région d'in Salah située dans le Sahara d' Algérie est caractérisée par un climat sec (chaud et aride).

3.3.1. Température :

La variation des températures moyennes mensuelles marque un maximum de 39°C en mois de Septembre puis décroît lentement jusqu'au mois de Janvier lorsqu'elle atteint 13°C. À partir du mois de Février elle commence par accroissement jusqu'au mois de Juillet où la température est maximum 45°C.

Tableau III-2 : Températures moyennes mensuelles de période 1981-2012

	Sep	Oct	Nov	Des	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Ann
T (°C)	33.4	26.9	19.8	14.6	13.8	16.9	21.1	25.5	30.6	35.8	37.4	36.7	26.1

3.3.2. Précipitation :

La pluviométrie de la région est très faible et irrégulière le Tableau III-3 : donne les précipitations mensuelles (mm) ,pour la période 1981-2012 :

Tableau III-3 : précipitations moyennes mensuelles de période 1981-2012.

	Sep	Oct	Nov	Des	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Ann
P (mm)	0.4	1.6	1.5	2.6	3.1	2.0	1.2	1.3	0.4	0.1	0	0.6	15.4

3.3.3. Évaporation :

L'évaporation de la région est très élevée le Tableau III-4 donne l'évaporation moyenne mensuelle (mm) de la période 1981-2012.

Tableau III-4 : Evaporations moyennes mensuelles de la période entre 1981 et 2012

	Sep	Oct	Nov	Des	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Ann
Ev(mm)	418	328	211	166	171	201	299	344	425	484	551	523	4120

CHAPITRE IV : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

1. Introduction :

Avant d'entamer les essais de gonflement sur les matériaux choisis, il a été procédé à l'identification physico-chimique et minéralogique des deux types d'argile ainsi que la détermination des caractéristiques physiques et chimiques des quatre types d'eau proposés pour l'étude de gonflement.

Les essais physiques sur les échantillons d'argiles ont été réalisés au niveau du service d'identification du laboratoire des travaux publics du sud à Ghardaïa.

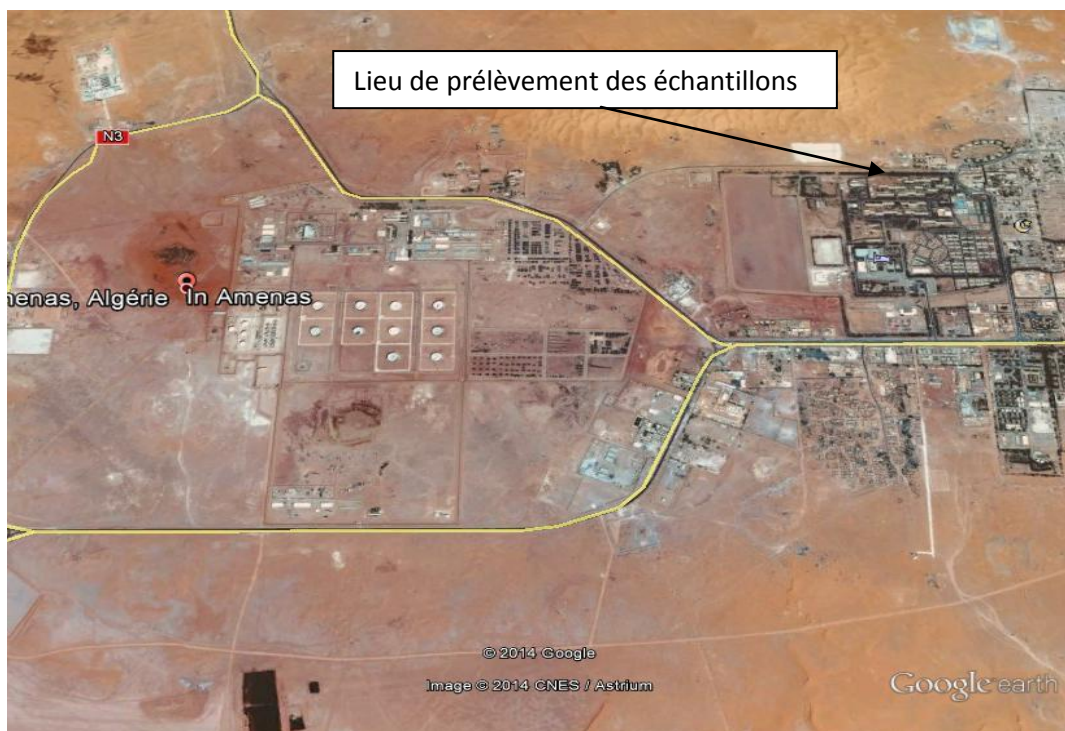
Les analyses chimiques et minéralogiques des deux types d'argiles ont été effectuées au niveau du laboratoire du Centre d'Etude et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction (C.E.T.I.M) de Boumerdes .

Les analyses des quatre types d'eau ont été faites par le laboratoire de l'Algérienne des Eaux (ADE) à Ghardaïa.

2. Argile de In Amenas :

2.1. Lieu de Prélèvement :

Les échantillons étudiés dans la région d'In Amenas ont été prélevés d'un site situé au Nord de la ville d'In Amenas, réservé pour la construction d'un centre des impôts, ses coordonnées géographiques sont : N28 03.420' E09° 35.400'.



Photos IV-1 : photos satellite du lieu de prélèvements des échantillons à In Amenas

Le site a subi des travaux de terrassement pour une éventuelle reconstitution de sol (dans le cadre des solutions adoptées pour remédier aux problèmes de gonflement des argiles de la région).

Cette opération de terrassement nous a permis de faire un prélèvement représentatif des échantillons intacts, les échantillons ont été prélevés à une profondeur entre 1,00 et 1,50 m.

2.2. Description visuelle de l'échantillon :

Le sol prélevé correspond à une argile de couleur rouge ocre, sèche, assez bien consolidée (sous forme de blocs).



Photos IV-2 : Echantillon d'argile de la région d'In Amenas

2.3. Détermination des caractéristiques de l'échantillon:

Afin de déterminer les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de l'argile étudiée, il a été procédé à une campagne d'analyse au laboratoire :

2.3.1. Caractéristiques physiques :

a) Analyse granulométrique et Sédimentométrie (XP 94-041 Dec. 1995 et NFP 94-057 Mai 1992):

L'analyse granulométrique complétée par une analyse sédimentométrique a permis de donner la distribution suivante :

Les résultats obtenus montrent qu'il s'agit d'un matériau fin qui contient plus de 34 % de fines argileuses et 44% de limon.

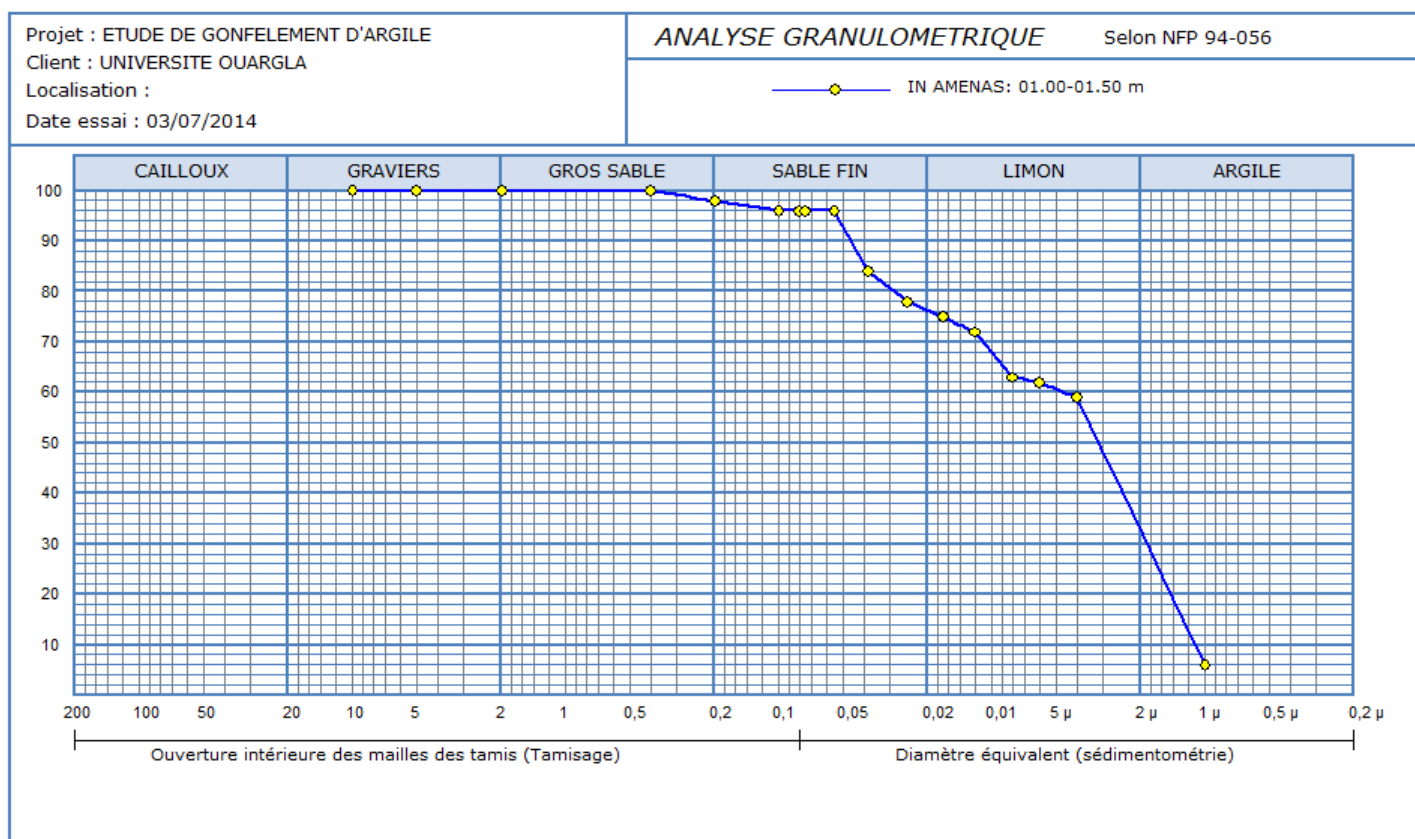


Figure IV-1: Représentation Graphique des résultats de l'analyse granulométrique (argile d'In Amenas)

b) Détermination des limites d'Atterberg (Norme NF 94-051 Mars 1993) :

Par définition les limites d'Atterberg sont les teneurs en eau pour les quelles le sol passe de l'état solide à l'état plastique puis à l'état liquide :

Les résultats obtenus pour l'argile d'In Amenas sont :

- Une Limite de Liquidité W_L : 45.83
- Une Limite de Plasticité W_P : 22.95
- Un Indice de Plasticité I_p : 22.89

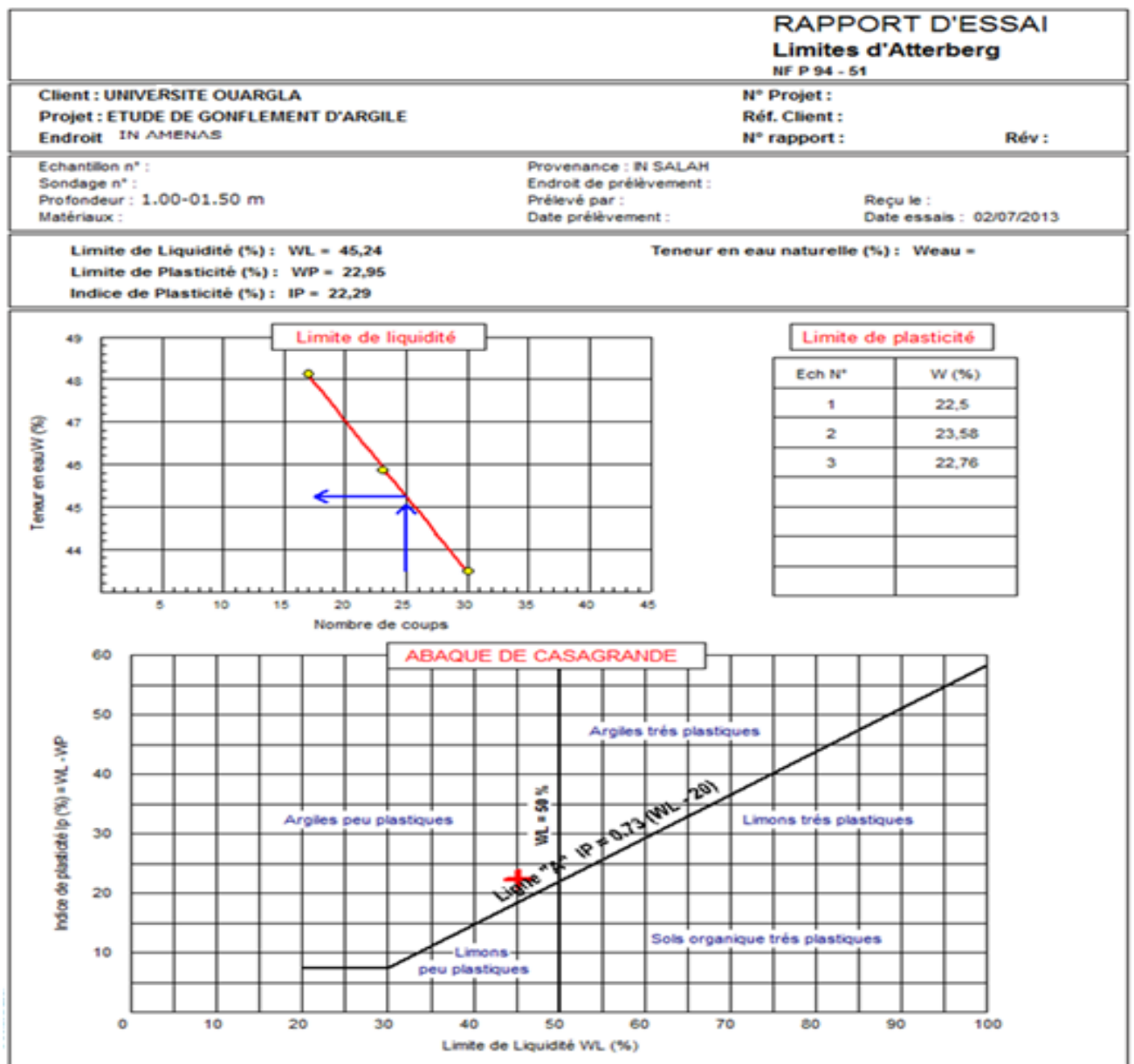


Figure IV-2: Représentation des résultats de l'essais de détermination des limites d'Atterberg(argile d'In Amenas) sur le Diagramme de Casagrande

Selon le diagramme de Casagrande le sol étudié correspond à une argile peu plastique.

c) Détermination de la teneur en eau (Norme NF 94-050 Septembre 1995) et la densité sèche (Norme NF 94-064 Novembre 1993) :

Les essais ont permis de déterminer la teneur en eau et la densité sèche du sol après son prélèvement.

Les résultats obtenus ont montré que la teneur en eau de l'échantillon prélevée est de 1.34%, tandis que la densité sèche est de 2.10 g/cm³.

Ces résultats montrent qu'il s'agit d'une argile dense et sèche.

d) Détermination de la Valeur au Bleu de Méthylène (Norme NF 94-068 Novembre 1993) :

Ce test permet de mesurer la capacité d'absorption du bleu de méthylène par les éléments fins, cette capacité nous renseigne sur l'activité de surface des argiles ;

Les résultats obtenus ont montré que la Valeur au Bleu de Méthylène de l'argile étudiée est de 2.62 dénotant une argile active.

2.3.2. Caractéristiques Chimiques et Minéralogiques :

Les analyses chimiques et minéralogiques ont été effectuées au niveau du laboratoire du Centre d'Etude et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction (C.E.T.I.M) de Boumerdes .

Les analyses réalisées sont :

- L'analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X (NF P 15-467);
- La détermination de la perte au feu (EN 1744-1) ;
- L'analyse minéralogique par diffraction RX (détermination des constituants minéraux et estimation semi-quantitative) (Mode opératoire dérivé du manuel d'utilisation et logiciel (XPERT DATA COLLECTOR)

Les résultats obtenus sont :

Tableau IV-1 : Composition chimique et minéralogiques de l'argile d'In Amenas

Minéraux présents	Compositions minéralogiques en %
Quartz SiO_2	45
Calcite CaCO_3	-
Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	-
Feldspaths K (Orthoclase) $\text{K}_2\text{O } 6\text{SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3$	06
Hydrobiotite $\text{K}(\text{Mg, Fe})_6(\text{Si, Al, Fe})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot \text{AH}_2\text{O}$	05
Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-
Illite $2\text{K}_2\text{O } \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ } 24\text{SiO}_2 \text{ } 2\text{H}_2\text{O}$	12
Kaolinite $\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5(\text{OH})_4$	25
Chlorite $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{O}_{18}\text{Si}_3$	-
Anatase TiO_2	-
Minéraux ferrugineux + Autres	07

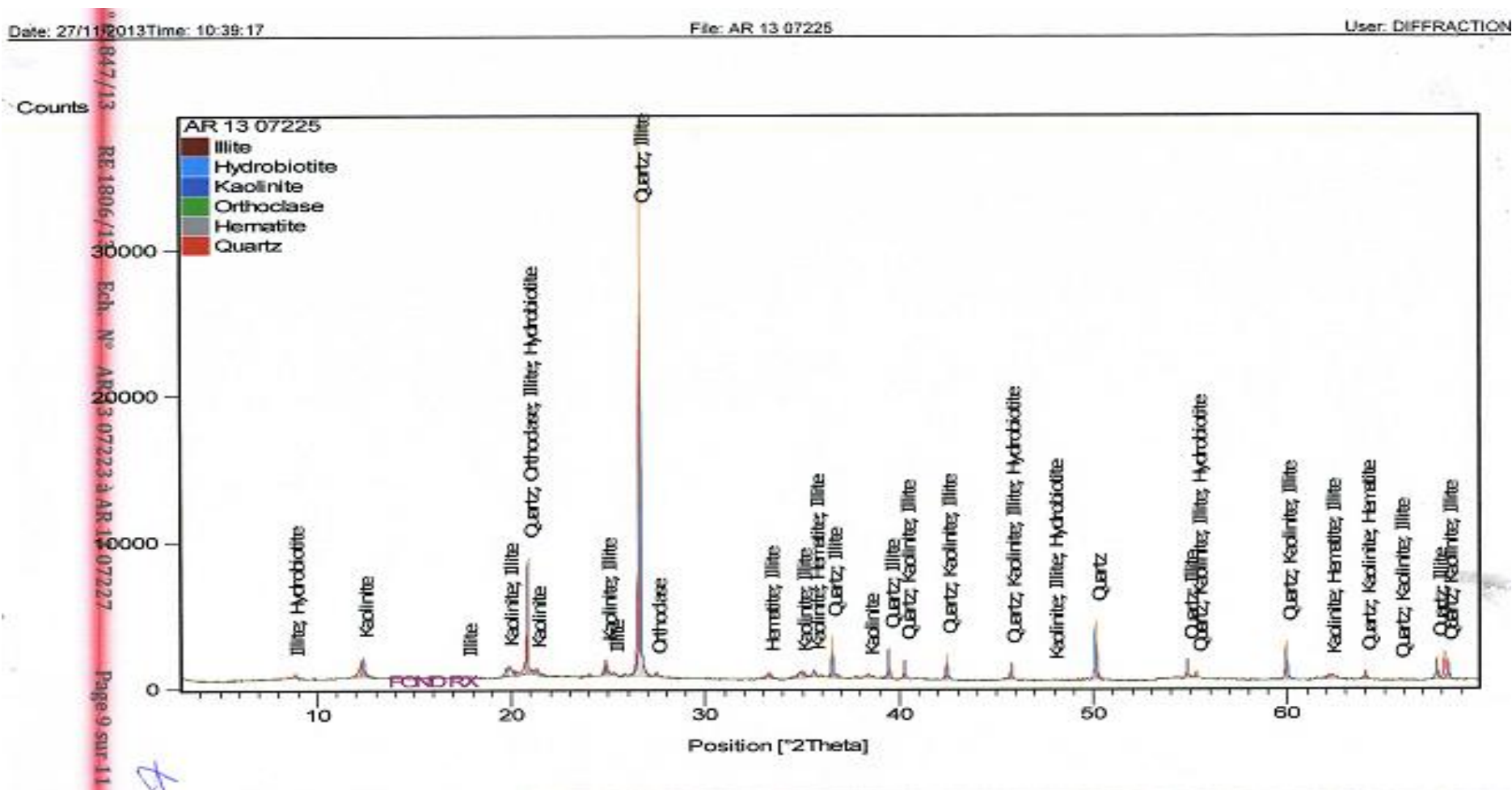


Figure IV-3 : Diagramme radio cristallographique de l'argile d'In Amenas

3. Argile d'In Salah :

3.1. Lieu de Prélèvement :

Les échantillons étudiés dans la région d'In Salah ont été prélevés au niveau de l'aérodrome de In Salah situé à environ 08 Km au Nord de la ville, les coordonnées géographiques du site sont : N27 14.728' E02° 30.996'.



Photos IV-3 : photos satellite du lieu de prélèvements des échantillons à In Salah

Le prélèvement a été fait dans le cadre d'une étude de renforcement de l'aérodrome de In Salah faite par L.T.P.S suite à la dégradation de la piste de l'aérodrome qui est probablement due au phénomène de gonflement des argiles formant l'assise du projet.



Photos IV-4 : Dégradation de la piste de l'aérodrome d'In Salah sous l'effet de gonflement de l'argile

Des puits de reconnaissance ont été réalisés sur les bords de la piste, les échantillons ont été prélevés sur le côté Ouest de la piste à une profondeur entre 1,00 et 1,50 m.



Photos IV-5 : prélèvements d'échantillon d'argile à partir d'un puits creusé à côté de la piste de l'aérodrome d'In Salah

3.2. Description visuelle de l'échantillon :

Le sol prélevé correspond à une argile violacée, assez humide, les échantillons prélevés sont intacts.



Photos IV-6 : Echantillon d'argile d'In Salah

3.3. Détermination des caractéristiques de l'échantillon:

Afin de déterminer les caractéristiques physico-chimique et minéralogique de l'argile étudiée, il a été procédé à une campagne d'analyse au laboratoire :

3.3.1. Caractéristiques physiques :

a) Analyse granulométrique et Sédimentométrique (XP 94-041 Dec. 1995 et NFP 94-057 Mai 1992):

L'analyse granulométrique complétée par une analyse sédimentométrique a permis de donner la distribution granulaire suivante :

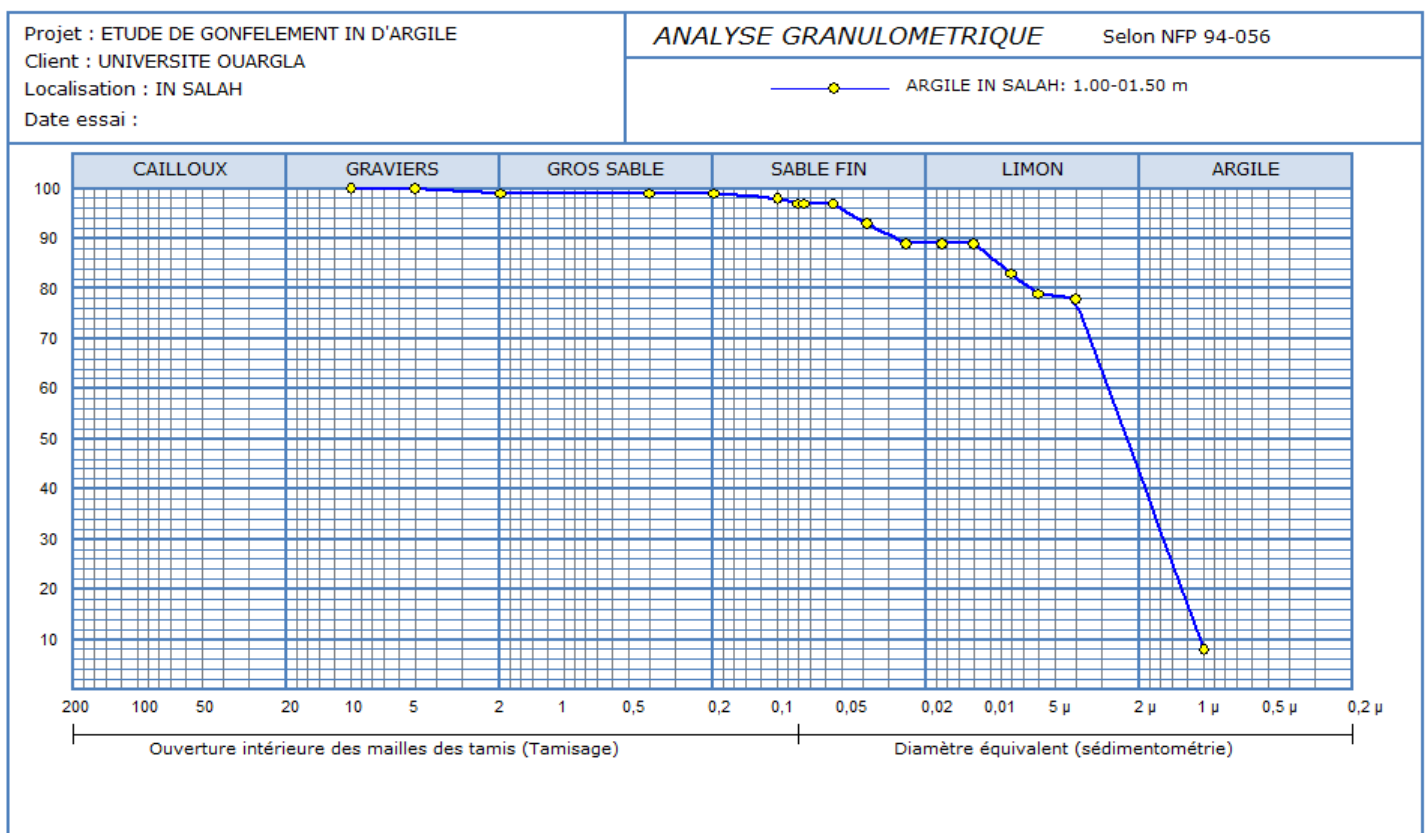


Figure IV-4: Représentation Graphique des résultats de l'analyse granulométrique (argile d'In Salah)

Les résultats obtenus montrent qu'il s'agit d'un matériau fin qui contient plus de 52 % de fines argileuses et 40% de limon .

b) Détermination des limites d'Atterberg (Norme NF 94-051 Mars 1993) :

Les résultats obtenus sont :

- Une Limite de Liquidité W_L : 79.67
- Une Limite de Plasticité W_p : 42.28
- Un Indice de Plasticité I_p : 37.39

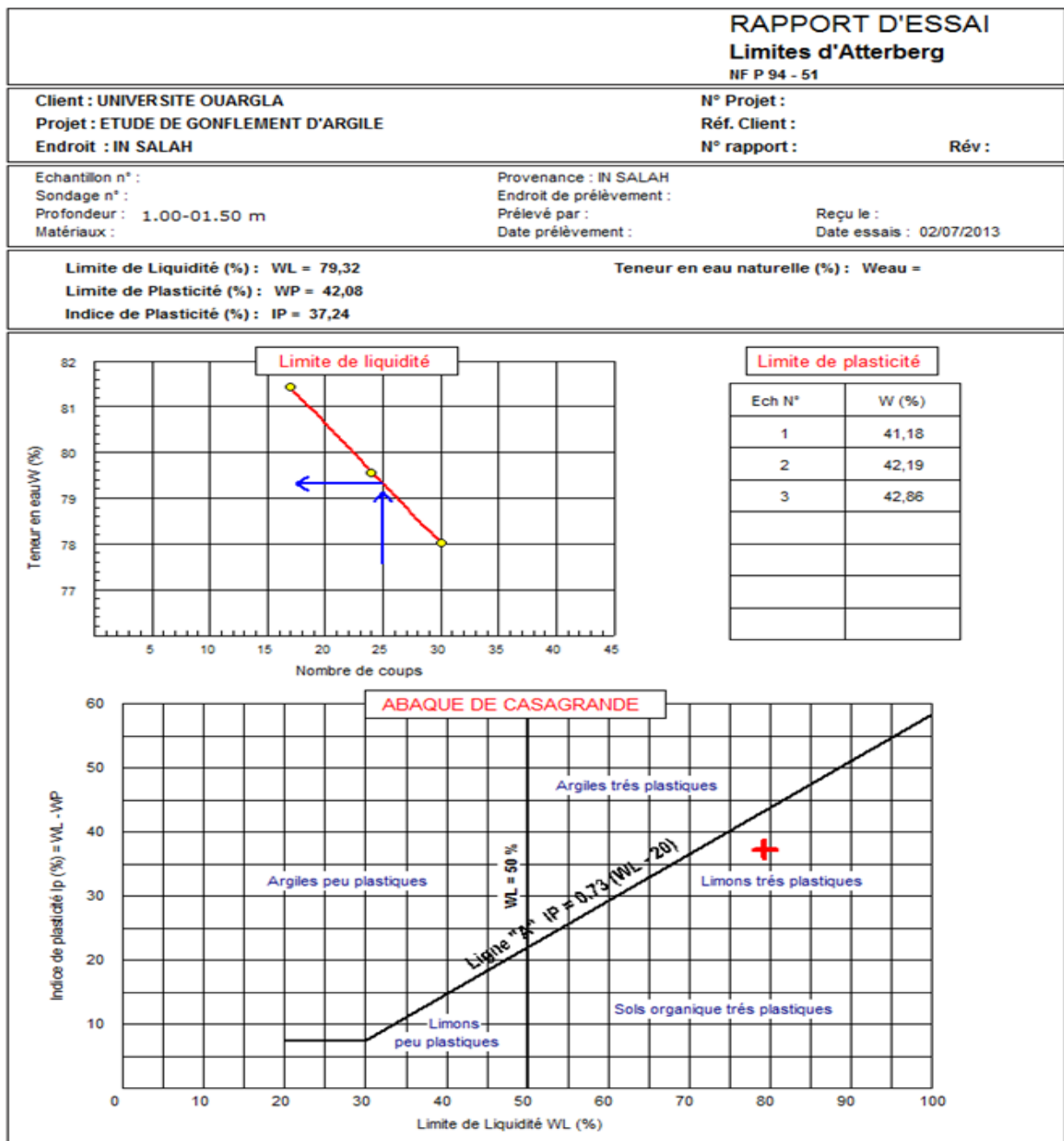


Figure IV-5: Représentation des résultats de l'essais de détermination des limites d'Atterberg(argile d'In Salah) sur le Diagramme de Casagrande

Selon le diagramme de Casagrande le sol étudié correspond à un **limon très plastique**.

c) Détermination de la teneur en eau (Norme NF 94-050 Septembre 1995) et la densité sèche (Norme NF 94-064 Novembre 1993) :

Les essais ont permis de déterminer la teneur en eau et la densité sèche du sol après son prélèvement.

Les résultats obtenus ont montré que la teneur en eau de l'échantillon prélevée est de 4.07%, tandis que la densité sèche est de 1.89 g/cm³.

Ces résultats montrent que l'argile est semi dense et qu'elle est sèche.

Détermination de la Valeur au Bleu de Méthylène (Norme NF 94-068 Novembre 1993) :

Les résultats obtenus ont montré que la Valeur au Bleu de Méthylène de l'argile étudiée est de 2.19 dénotant une argile active:

3.3.2. Caractéristiques Chimiques et minéralogiques :

Les résultats obtenus sont :

Tableau IV-2 : Composition chimique et minéralogiques de l'argile d'In Salah

Minéraux présents	Compositions minéralogiques en %
Quartz SiO_2	18
Calcite CaCO_3	-
Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	-
Feldspaths K (Orthoclase) $\text{K}_2\text{O } 6\text{SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3$	05
Hydrobiotite $\text{K}(\text{Mg, Fe})_6(\text{Si, Al, Fe})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot \text{AH}_2\text{O}$	-
Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	05
Illite $2\text{K}_2\text{O } \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ } 24\text{SiO}_2 \text{ } 2\text{H}_2\text{O}$	14
Kaolinite $\text{Al}_2 \text{ Si}_2 \text{ O}_5(\text{OH})_4$	48
Chlorite $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{O}_{18}\text{Si}_3$	-
Anatase TiO_2	01
Minéraux ferrugineux + Autres	09

Ces résultats montrent une dominance de la Kaolinite

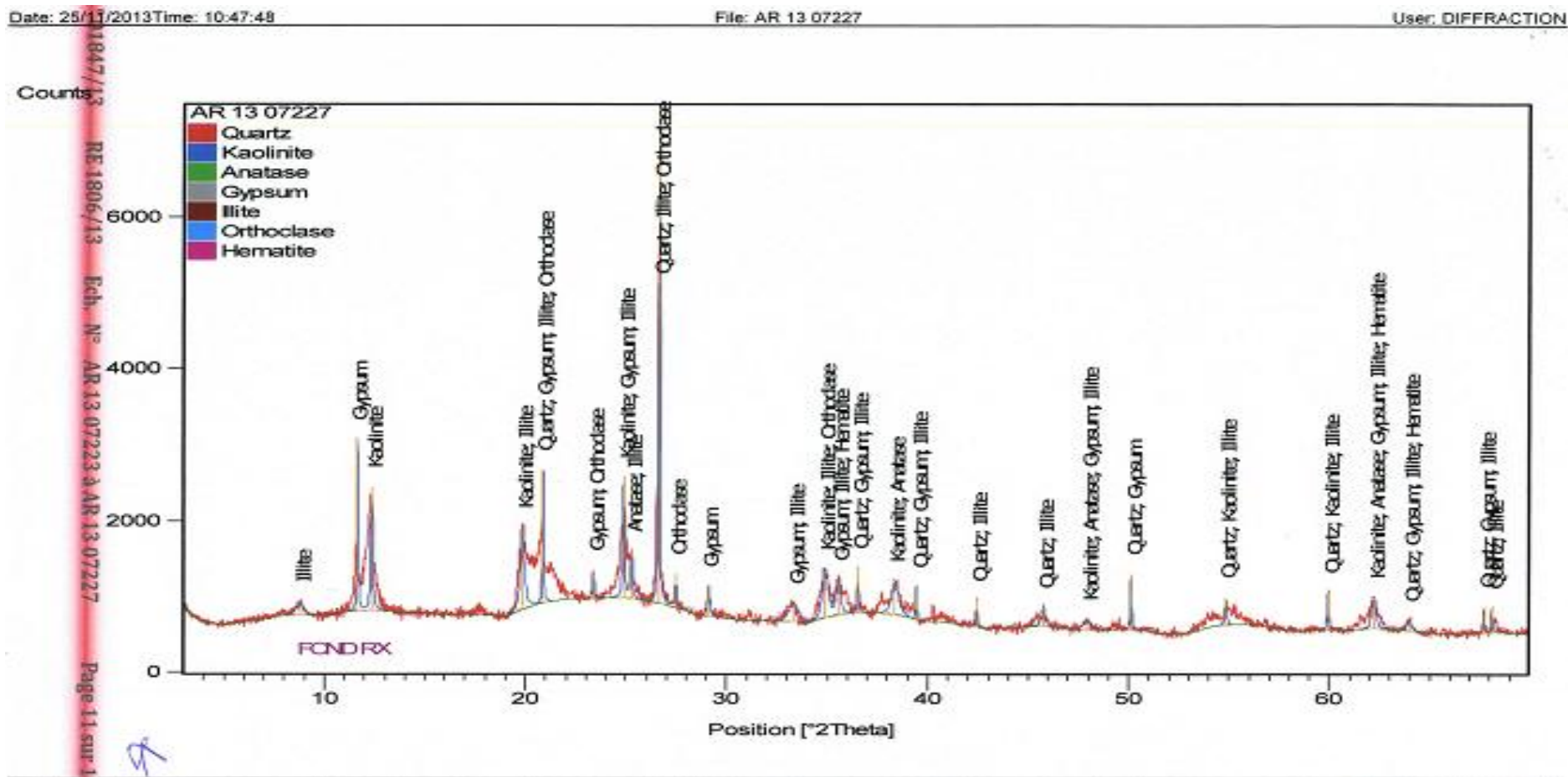


Figure IV-6: Diagramme radio cristallographique de l'argile d'In Amenas

4. Les eaux

Dans le cadre du présent travail, et afin de nous permettre de faire la comparaison de gonflement, nous avons utilisé quatre types d'eau différents à savoir :

Eau distillée ;

Eau potable (eau du robinet) ;

Eau de drainage (eau de la nappe phréatique) ;

Eau usée

4.1. Lieu de Prélèvement :

Les échantillons des eaux utilisées ont été prélevés de :

Eau distillée : produit au niveau de l'unité de production de la S.A.R.L PRO.CHI.SA à Ghardaïa ;



Photos IV-7 : Echantillon d'eau distillée

Eau potable : ce type d'eau a été prélevé à partir du robinet au niveau laboratoire des Travaux Publics du Sud à Bouhraoua à Ghardaïa ;



Photos IV-8 : Echantillon d'eau potable

Eau de drainage : l'eau de drainage a été prélevé des drains situés dans le champ d'essai de l'Université de Ouargla (ex E.T.A.S) ;



Photos IV-9: Echantillon d'eau de la nappe (drainage)

Eau usée : elle a été prélevée à l'amont de la station d'épuration de Ghardaïa située à l'Est de la ville d'El Atteuf .



Photos IV-10 : Echantillon d'eau usée

4.2. caractéristiques physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des quatre échantillons d'eau utilisés ont été déterminées au niveau du laboratoire de l'Algérienne des Eaux (ADE) à Ghardaïa, les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau IV-3 : Caractéristiques physico-chimiques des quatre types d'eau

Type d'eau		Eau	Eau	Eau	Eau
Paramètres	unité	distillée	potable	de drainage	usée
PH	-	8.55	7.70	7.50	7.67
Conductivité	µs/cm	10.4	2020	5050	3450
Turbidité	NTK	0.7	0.83	6.15	
Résidu sec	mg/l	0	2020		
Salinité	‰	0	1	3.00	2.3
T.D.S	mg/l	5	1090	-	-
Ammonium NH ₄ ⁺	mg/l	0.00	0.005		40
Nitrite NO ₂ ⁻	mg/l	0.006	0	0.252	0.614
Nitrate NO ₃ ⁻	mg/l		17.46	20.11	1.03
Ortophosphate PO ₄ ³⁻	mg/l	0.033	0	0	0.22
Calcium Ca ²⁺	mg/l	1.60	176.35	142.684	
Magnésium Mg ²⁺	mg/l	0	68.04	153.09	
Sodium Na ⁺	mg/l	1.42	186.36	430	
Potassium K ⁺	mg/l	0	15	20	
Chlorures Cl ⁻	mg/l	10.63	404.16	1148.6	520.14
Sulfates SO ₄ ²⁻	mg/l	15.20	740.79	1435.48	620.45
Bicarbonate HCO ₃ ⁻	mg/l		231.8	-	
Dureté totale	mg/l	4	720	1520	421
Fer Fe ²⁺	mg/l	0.002	0	0.183	0.57

5. Conclusion :

Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques ont permis de tirer les conclusions suivantes :

5.1. Argile de In Amenas :

- Une granulométrie dénotant un limon argileux ;
- Une plasticité modérée ;
- L'activité argileuse importante ;
- Une dominance de SiO_2
- Selon la corrélation de Snethen : un potentiel de gonflement élevé

5.2. Argile d'In Salah :

- Une granulométrie dénotant une argile limoneuse ;
- Une plasticité élevée ;
- L'activité argileuse importante ;
- Une dominance de Kaolinite
- Selon la corrélation de Snethen : un potentiel de gonflement très élevé

Selon les caractéristiques sus citées on peut dire que les deux argiles choisies pour faire cette étude, présentent un bon exemple pratique.

5.3. Eaux :

La diversification dans Les caractéristiques physico-chimiques des quatre types d'eau nous permet d'étudier l'influence de la nature d'eau sur le phénomène de gonflement.

CHAPITRE V : ETUDE DE GONFLEMENT

1. Introduction :

Plusieurs types d'essais peuvent servir à quantifier le processus de gonflement en fournissant des paramètres exploitables dans le dimensionnement des ouvrages en génie civil ou d'autre domaine ayant des relations avec les argiles gonflantes. Dans la pratique les essais peuvent être faits in situ, ou bien en laboratoire.

Deux grandeurs sont utilisées pour caractériser le gonflement d'un sol :

- Le potentiel de gonflement qui correspond à la variation du volume d'un échantillon libre non soumis à des charges mécaniques ;
- La pression de gonflement qui peut se définir comme étant la pression induite par l'hydratation d'un échantillon confiné dans des conditions isochores ou bien par la pression qu'il faudrait appliquer à un échantillon ayant gonflé librement pour le ramener à son état initial non déformé.

Il est remarqué que le potentiel de gonflement n'est pas proportionnel à la pression de gonflement, et dans la pratique il faut connaître ces deux grandeurs pour caractériser le gonflement.

Les essais de laboratoire permettant de mesurer la pression de gonflement sont effectués grâce à un appareil appelé Oedomètre. Plusieurs types d'essai sont utilisés comme il a été déjà cité dans le chapitre II.

Dans le présent travail nous avons utilisé pour les mesures de gonflement, l'essai à l'oedomètre selon la procédure de détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes. Les essais ont été réalisés au niveau du service de mécanique de sol du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (L.T.P.S) à Ghardaïa.

2. Protocoles d'essai :

Les essais de gonflement sont menés sur des échantillons intacts secs (à une teneur en eau nulle) à l'aide des oedomètres selon le processus d'essai de gonflement à l'oedomètre (détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes) décrit par la norme XP P 94-091 Décembre 1995.

L'essai s'effectue sur plusieurs éprouvettes d'un même échantillon et prélevées sensiblement au même niveau. Chaque éprouvette de sol est placée dans une enceinte cylindrique rigide (oedomètre) et un dispositif de chargement applique sur cette éprouvette un effort axial vertical maintenu constant.

L'essai consiste à appliquer à chaque éprouvette une contrainte verticale différente et à mesurer sa variation de hauteur lorsqu'elle est mise en présence d'eau.

Les valeurs de déformation finale de chaque éprouvette $\Delta H_f/H_i$ sont reportées sur le diagramme semi- logarithmique afin de déterminer la relation $\Delta H_f/H_i$ en fonction de $\log \sigma$.

La valeur absolue de la pente de cette droite est appelée rapport de gonflement R_g donc on a la relation :

$$\Delta H_f/H_i = - R_g \log (\sigma_g/ \sigma)$$

Où : ΔH_f : la variation de hauteur de l'éprouvette sous la contrainte de l'essai lors de la phase d'imbibition.

H_i : la hauteur juste avant la mise en eau de l'éprouvette sous la contrainte de l'essai

R_g : le rapport de gonflement

σ_g : la pression de gonflement du matériau, exprimé en bars

σ : la contrainte axiale appliquée à une éprouvette, exprimé en bars

3. Présentation des essais :

Les essais de gonflement à l'oedomètre (détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes) ont été effectués sur les deux types d'argile (In Amenas et In Salah) en utilisant pour chaque argile quatre eaux : eau distillée, eau potable de Ghardaïa (eau de robinet), eau de drainage de Ouargla et en fin l'eau usée de Ghardaïa.



Photos V- 1 : les oedomètres utilisés pour les essais de gonflement (salle de M.D.S au niveau du L.T.P.Sud à Ghardaïa)

Les mêmes paramètres d'essai ont été respectés dans le but de faire une comparaison des résultats.

Les échantillons de l'argile d'In Amenas ont été placés dans les cellules de 70 mm, par contre ceux de l'argile d'In Salah ont été placés dans les cellules de 50 mm.



Photos V- 2 : les éprouvette confectionnées à partir des échantillons des deux argiles (la rouge argile d'In Amenas et la violée Celle d'In Salah)

Les Contraintes appliquées pour les deux argiles sont les mêmes, il s'agit de : 10 Kpa, 50 Kpa, 100 Kpa et 150 Kpa .



Photos V- 3: système d'application des charges sur l'Oedomètre

Les essais ont été réalisés sur le même intervalle de temps soit : 24 heures avant l'imbibition et 72 Heures après imbibition, la durée d'essais a permet de respecter les conditions de la norme.

4. Résultats des essais :

4.1. Argile de In Amenas :



Photos V- 4: les éprouvettes de l'argile d'In Amenas récupérées à la fin de l'essai

4.1.1. Détermination des caractéristiques de gonflement :

Les caractéristiques de gonflement exprimé par le taux de gonflement $\Delta H_f/H_i(\%)$ et la contrainte de gonflement σ_g (bars) ont été mesurés pour l'argile d'In Amenas en utilisant les quatre eaux. Les résultats sont présentés sur les courbes suivantes :

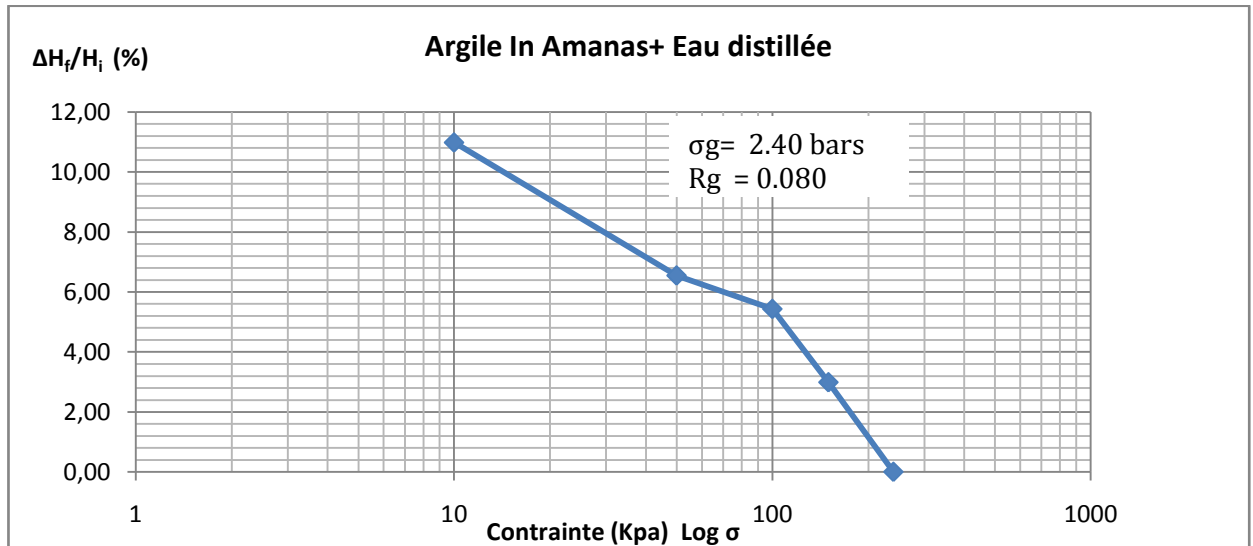


Figure V-1 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant l'eau distillée

Le gonflement de l'argile d'In Amenas en présence d'eau distillée a présenté une contrainte de gonflement de l'ordre de 2.40 bars, avec un taux de gonflement de l'ordre de 10.99 %. Le rapport de gonflement de cet essai est de 0.080.

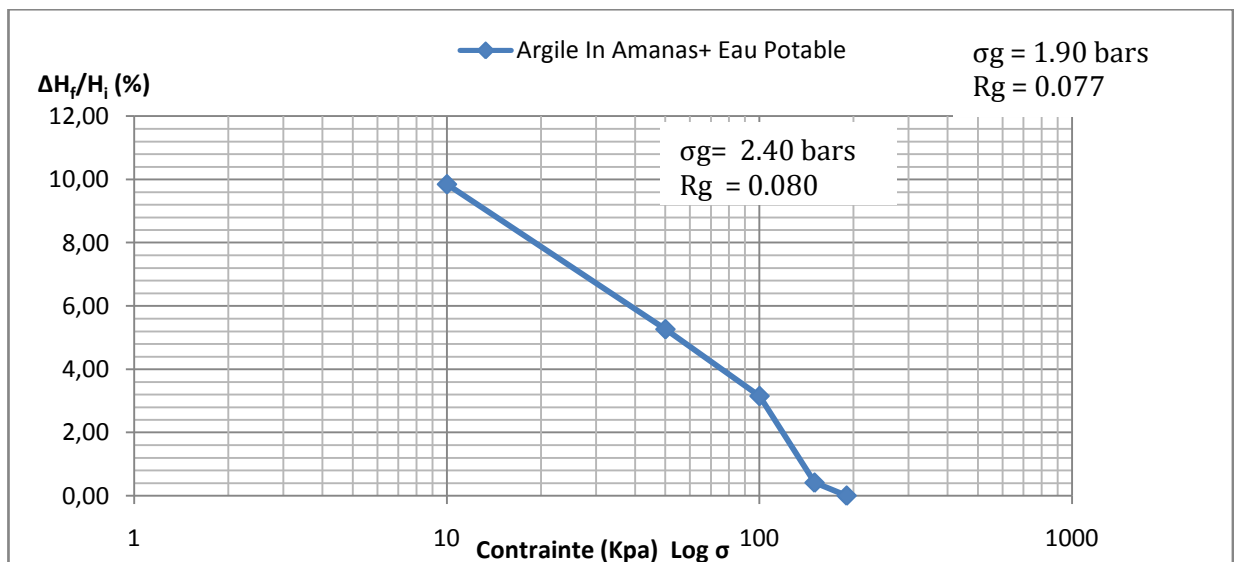


Figure V-2 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant l'eau Potable

Le gonflement de l'argile d'In Amenas en présence de l'eau potable (eau de robinet) a présenté une contrainte de gonflement de 1.90 bars, avec un taux de gonflement de l'ordre de 9.84 %. Le rapport de gonflement de cet essai est de 0.077.

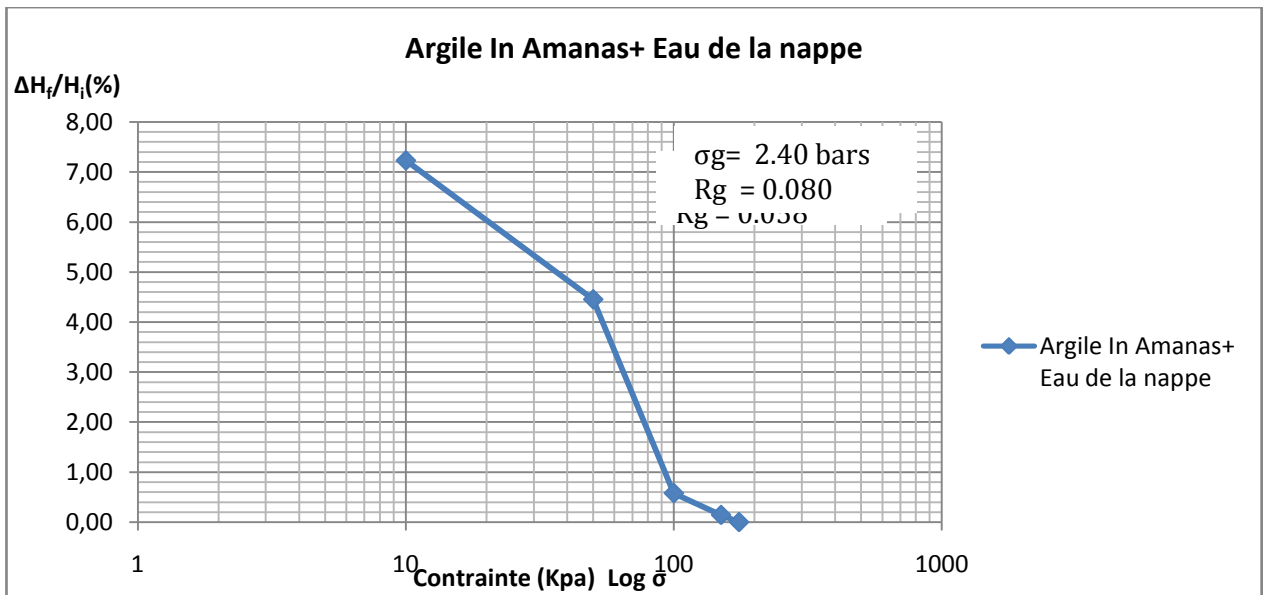


Figure V-3 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant l'eau de la nappe

Le gonflement de l'argile d'In Amenas en présence de l'eau de la nappe (eau de drainage) a présenté une contrainte de gonflement de 1.65 bars, avec un taux de gonflement de l'ordre de 7.23 %. Le rapport de gonflement de cet essai est de 0.058.

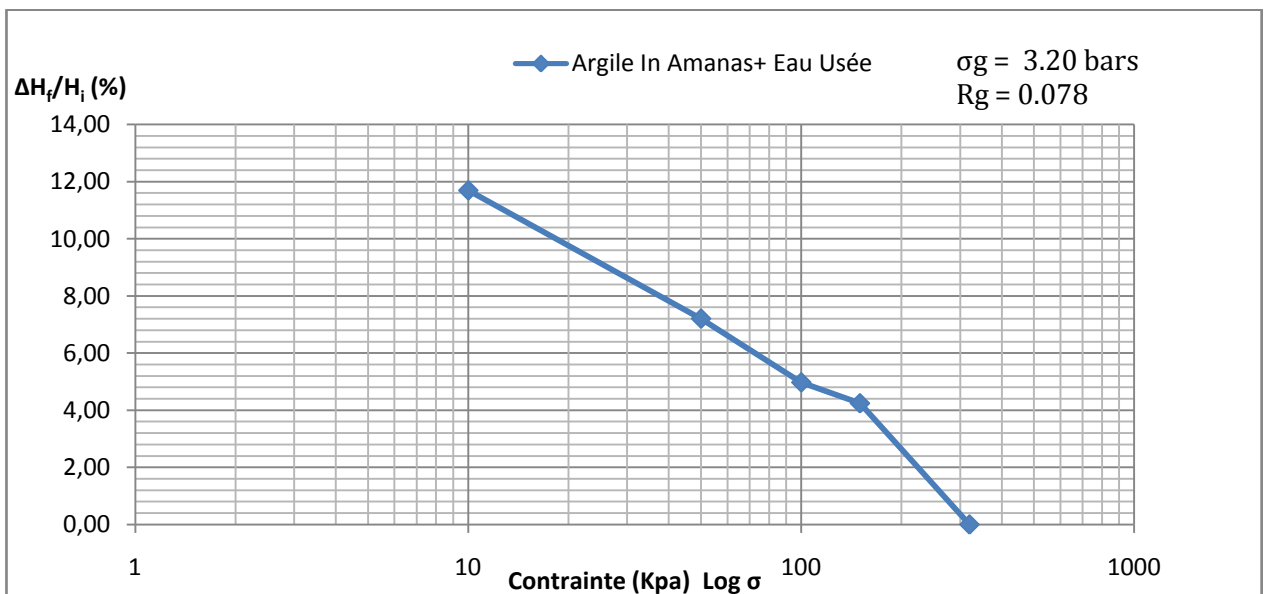


Figure V-4 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant l'eau usée

Le gonflement de l'Argile d'In Amenas en présence de l'eau usée a présenté une contrainte de gonflement de 3.20 bars, avec un taux de gonflement de l'ordre de 11.69 %. Le rapport de gonflement de cet essai est de 0.078.

Les caractéristiques de gonflement obtenues pour cette argile en utilisant les quatre eaux, peuvent être résumées dans le tableau suivant :

Tableau V-1: Caractéristiques de gonflement de l'échantillon d'In Amenas

Argile d'In Amenas			
Type d'eau utilisée	Taux de gonflement $\Delta H_f/H_i$ (%)	Contrainte de Gonflement σ_g (bars)	Rapport de gonflement R_g
Eau distillée	10.99	2.40	0.080
Eau potable	9.84	1.90	0.077
Eau de la nappe	7.23	1.65	0.058
Eau usée	11.69	3.20	0.078

La figure suivante présente les quatre courbes de gonflement de l'argile d'In Amenas en utilisant les quatre types d'eau

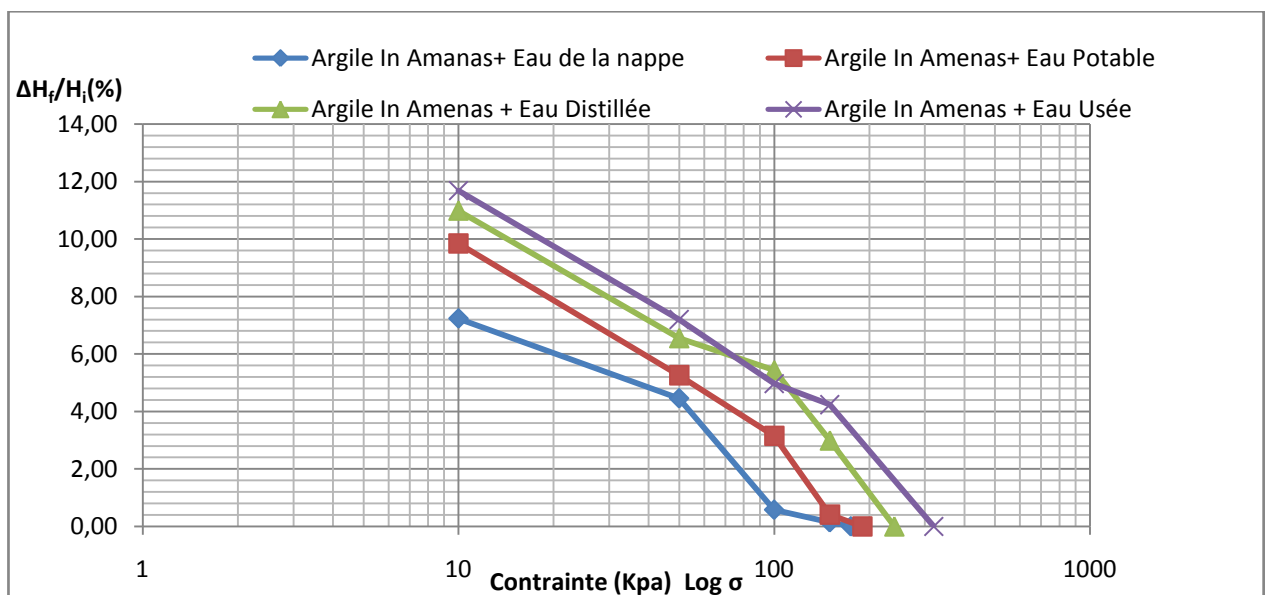


Figure V-5 : Les courbes de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Amenas en utilisant les quatre eaux

Les histogrammes suivants, représentent l'évolution des caractéristiques de gonflement en fonction de la nature d'eau.

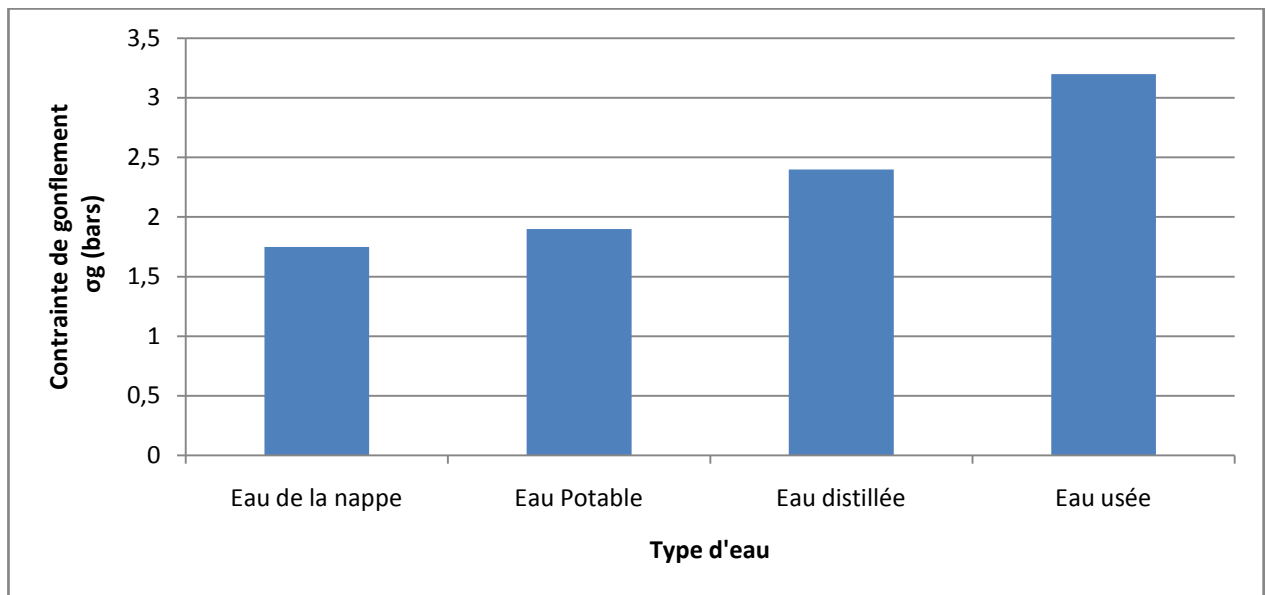


Figure V-6: Histogrammes montrant l'évolution de la contrainte de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Amenas)

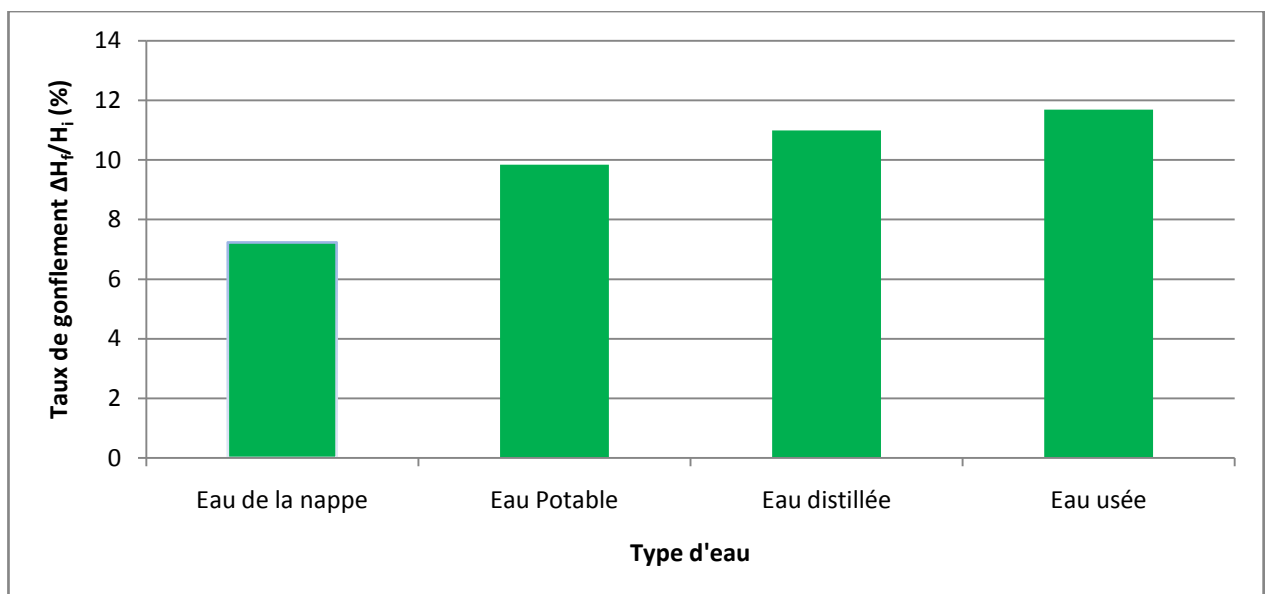


Figure V-7: Histogrammes montrant l'évolution du Taux de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Amenas)

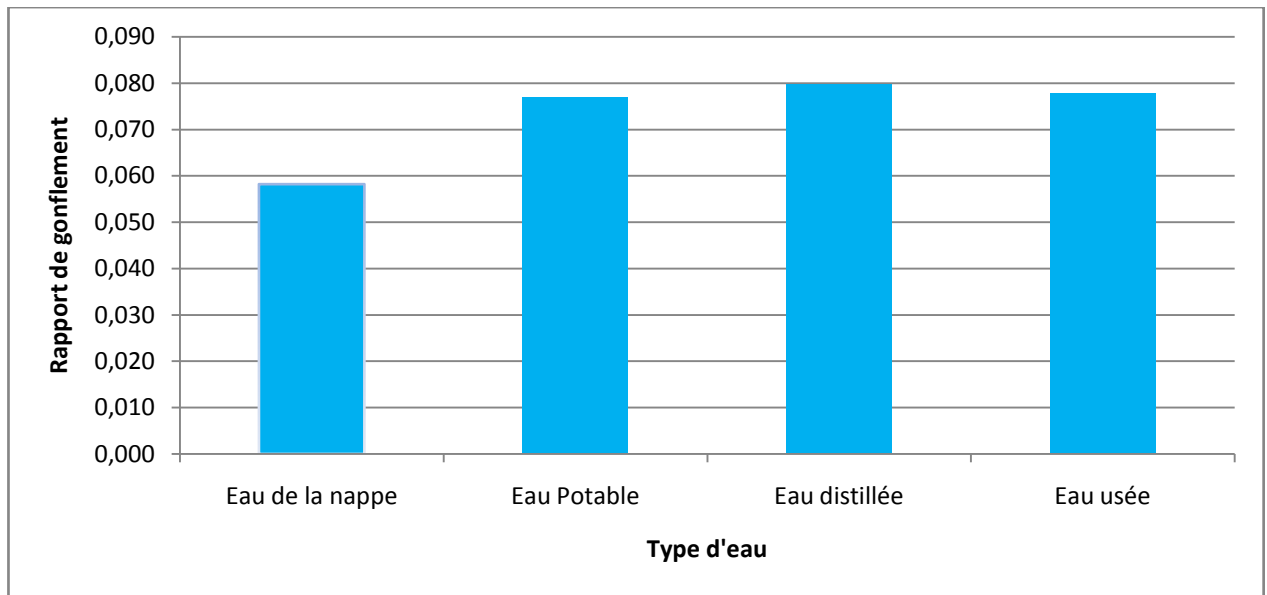


Figure V-8 : Histogrammes montrant l'évolution du Rapport de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Amenas)

Ces résultats nous a permis de constater que la contrainte de gonflement est passée de 1.65 bars lorsqu'on utilise l'eau de la nappe, à 3.20 bars en utilisant l'eau usée. D'autre part, le taux de gonflement varie de 7.23% dans le cas d'eau de la nappe, à 11.69% pour l'eau usée. Cela montre une influence de la nature d'eau sur les deux paramètres.

Le rapport de gonflement est de 0.058 lorsqu'on utilise l'eau de la nappe, et il est au voisinage de 0.078 dans les trois autres cas.

Ces résultats confirment que le potentiel de gonflement n'est pas proportionnel à la pression de gonflement

On peut remarquer que les caractéristiques de gonflement sont faibles lorsqu'on utilise l'eau de la nappe (eau à forte conductivité), par contre ils sont plus importantes pour l'eau distillée (eau à faible conductivité)

Il a été remarqué que l'eau usée malgré sa conductivité élevée, elle a présenté des caractéristiques de gonflement élevée, ceci peut être justifiée par la présence d'autres éléments qui sont spécifiques à l'eau usée.

4.1.2. Etude de cinétique de gonflement :

La cinétique de gonflement c'est l'évolution de la déformation verticale de l'échantillon en fonction du temps.

Les essais réalisés sur l'argile d'In Amenas ont permis de tracer les courbes suivantes :

a) L'évolution de gonflement dans le temps en fonction de la contrainte appliquée :

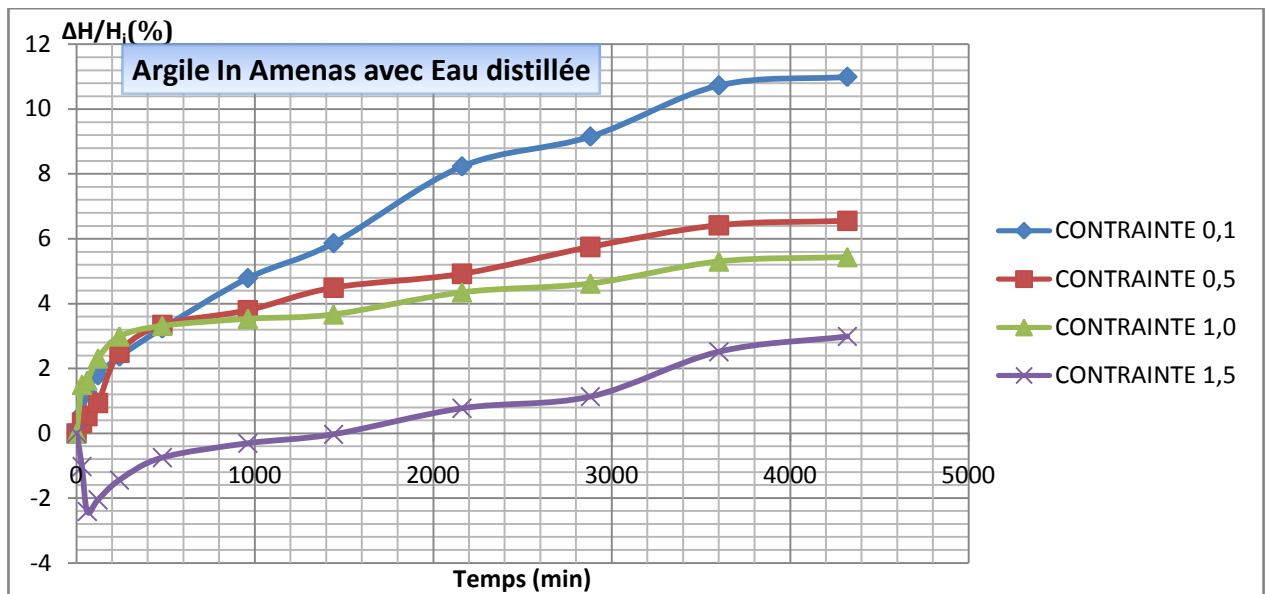


Figure V-9 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Amenas sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau distillée

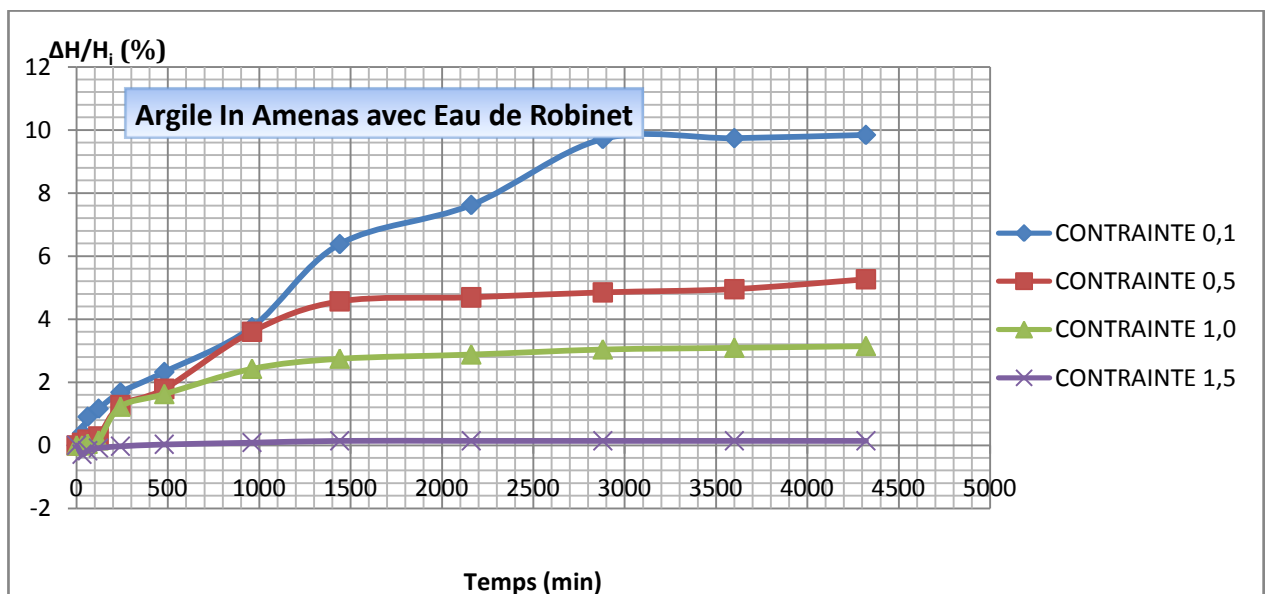


Figure V- 10 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Amenas sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau de robinet

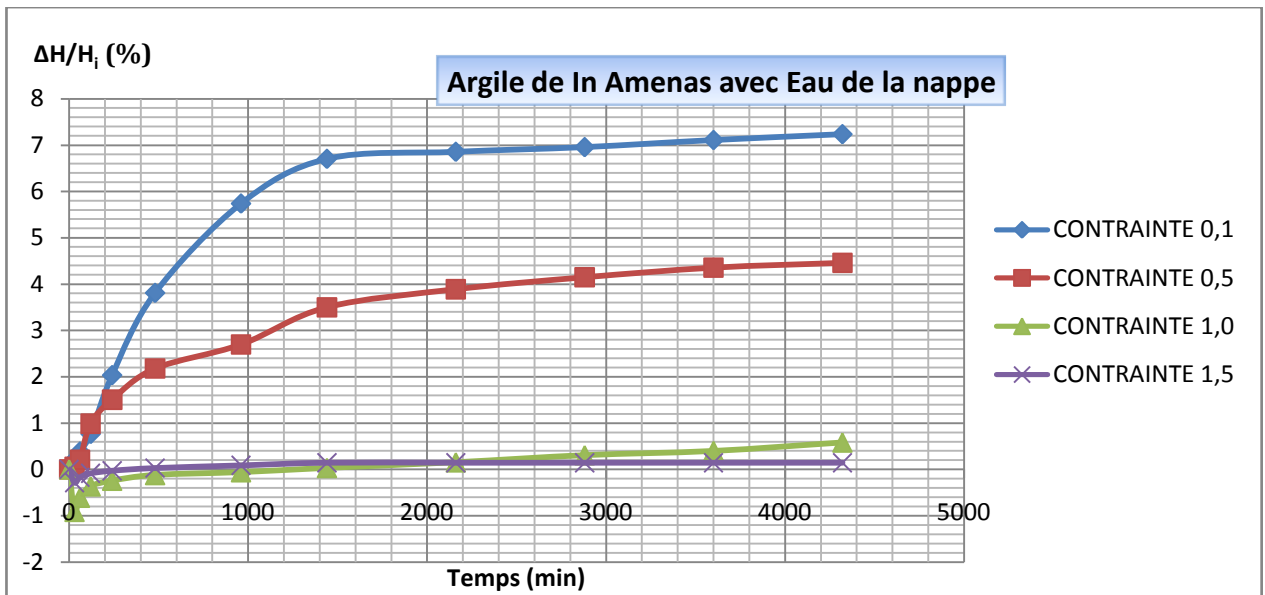


Figure V- 11 développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Amenas sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau de la nappe

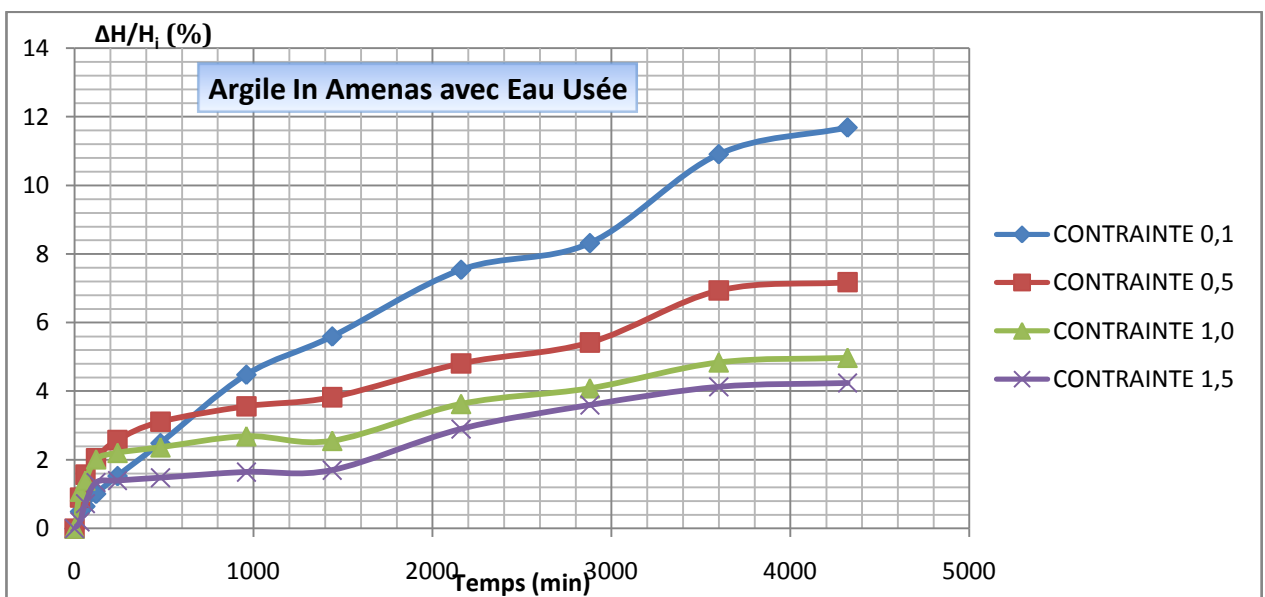


Figure V-12 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Amenas sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau usée

À partir de ces courbes on peut remarquer que :

- ✓ En utilisant l'eau de la nappe ; une stabilisation relative de gonflement à été obtenue après environ 1000 minutes (16 heures) ;
- ✓ En utilisant l'eau potable (eau de robinet) ; le début de stabilisation de gonflement est observé à partir de 2880 minutes (48 heures) ;
- ✓ En utilisant l'eau distillée et l'eau usée, le début de stabilisation de gonflement n'a été observé qu'à partir de 3600 minutes (60 heures).

b) L'évolution de gonflement dans le temps en fonction de la nature d'eau (pour les quatre contraintes appliquées) :

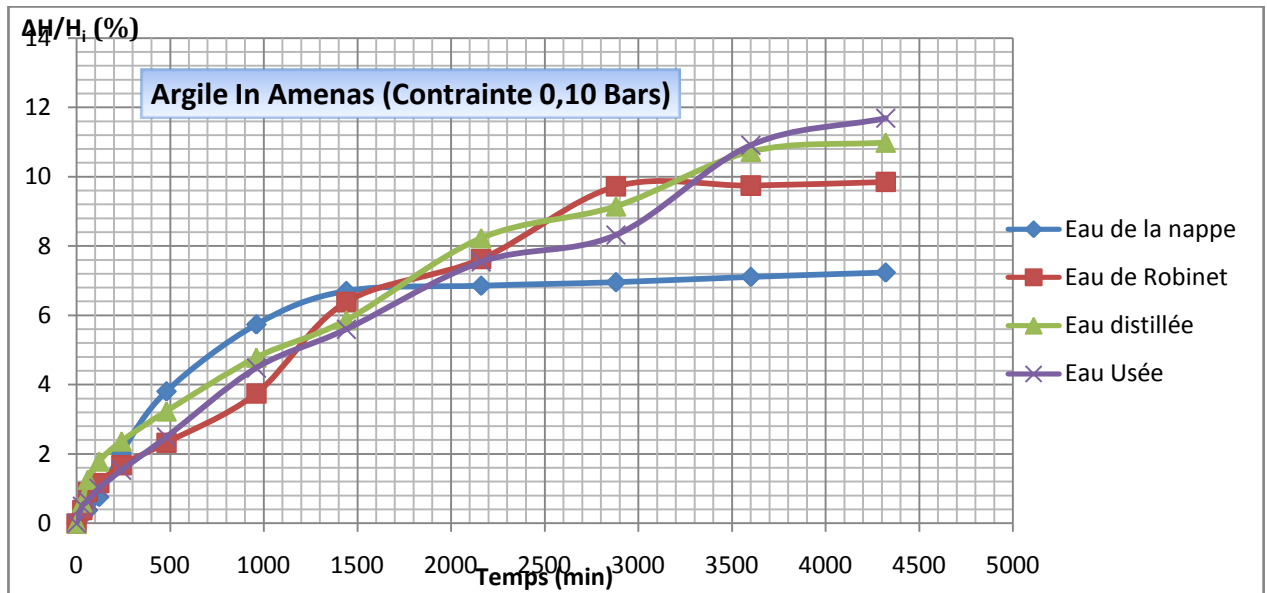


Figure V -13 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Amenas) sous une contrainte : 0.10 bars

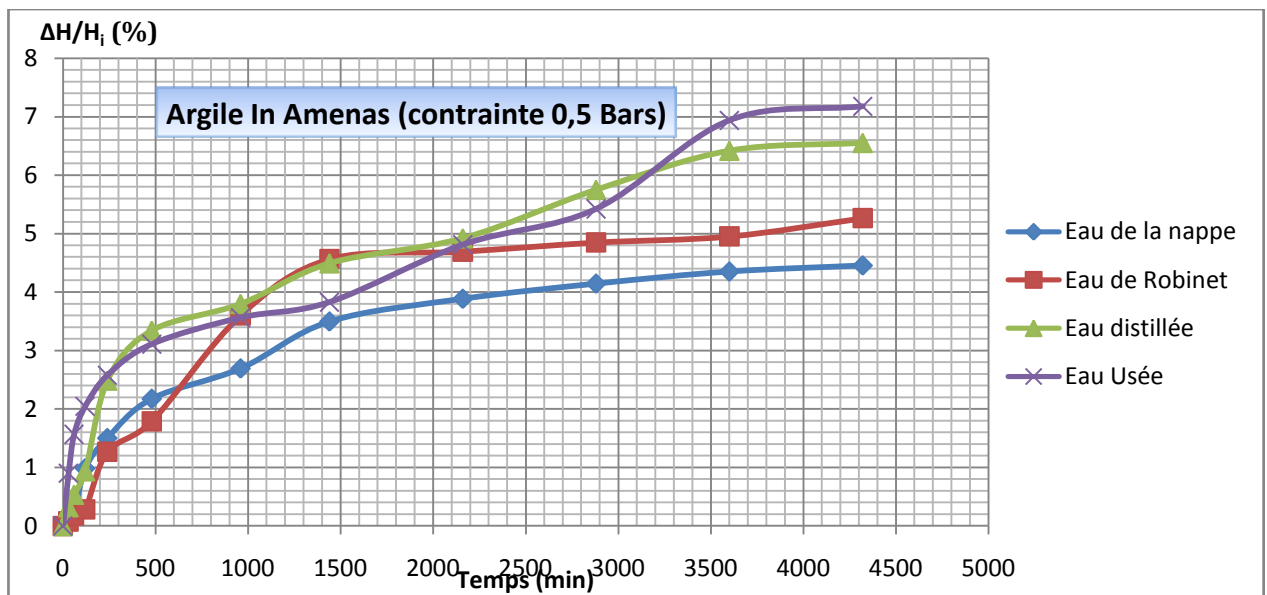


Figure V-14: Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Amenas) sous une contrainte : 0.50 bars

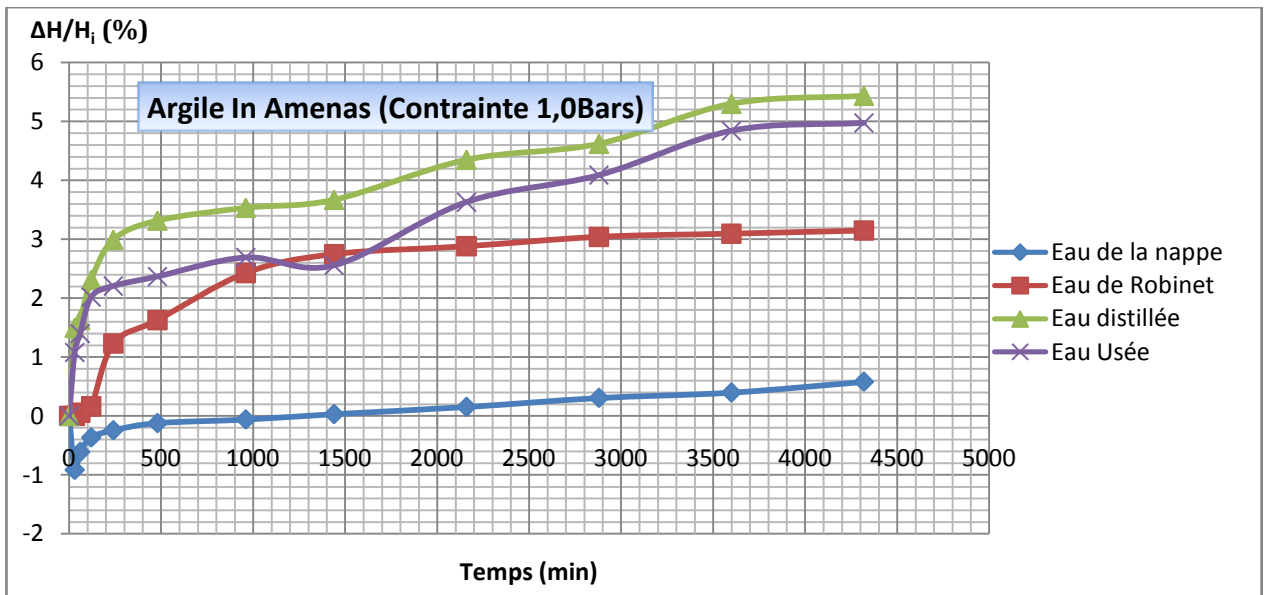


Figure V-15 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Amenas) sous une contrainte :1.0 bars

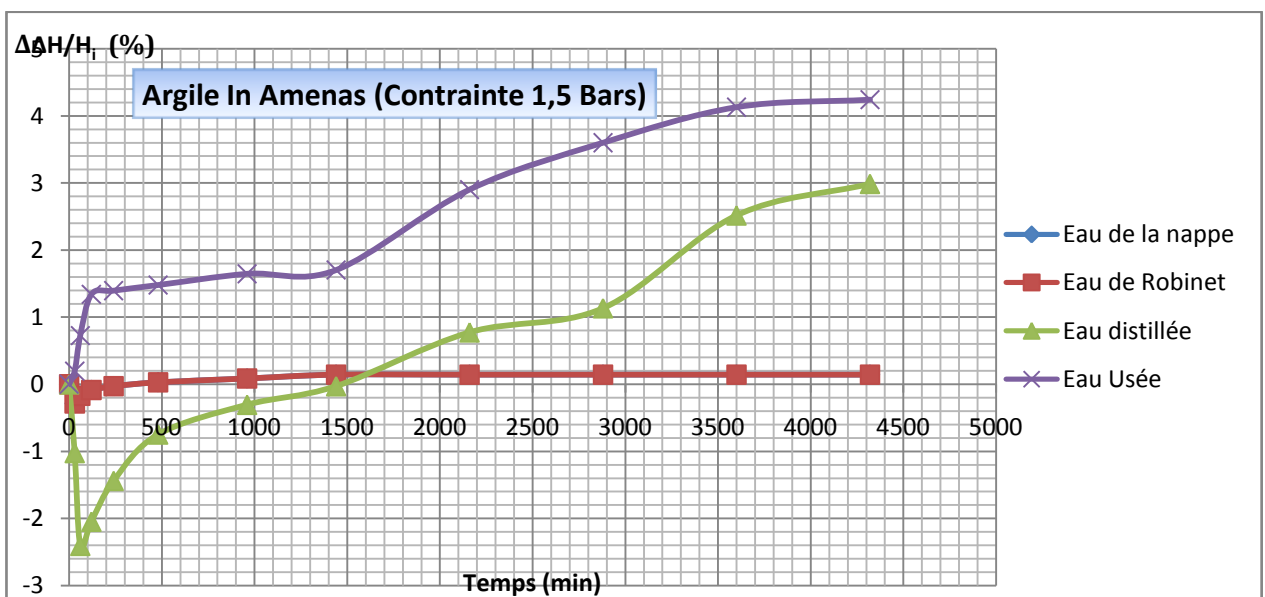


Figure V-16 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Amenas) sous une contrainte : 1.50 bars

L'exploitation des courbes de chaque chargement nous permet de constater :

Pour les faibles contraintes (0.1 et 0.5 bars), l'argile au niveau du gonflement primaire se manifeste de la même manière pour les quatre types d'eau et la différence n'a été observée qu'à partir de 3000 minutes (48 heures).

A forte contraintes (en se rapprochant de la contrainte de gonflement), le chemin de gonflement est bien distingué dès le début.

4.2. Argile d'In Salah :



Photos V - 5 : les éprouvettes de l'argile d'In Salah récupérées à la fin de l'essai

4.2.1. Détermination des caractéristiques de gonflement :

Les caractéristiques de gonflement exprimé par le taux de gonflement $\Delta h/h_i$ et la contrainte de gonflement σ_g ont été mesurés pour l'argile d'In Salah en utilisant les quatre eaux. Les résultats sont présentés sur les courbes suivantes :

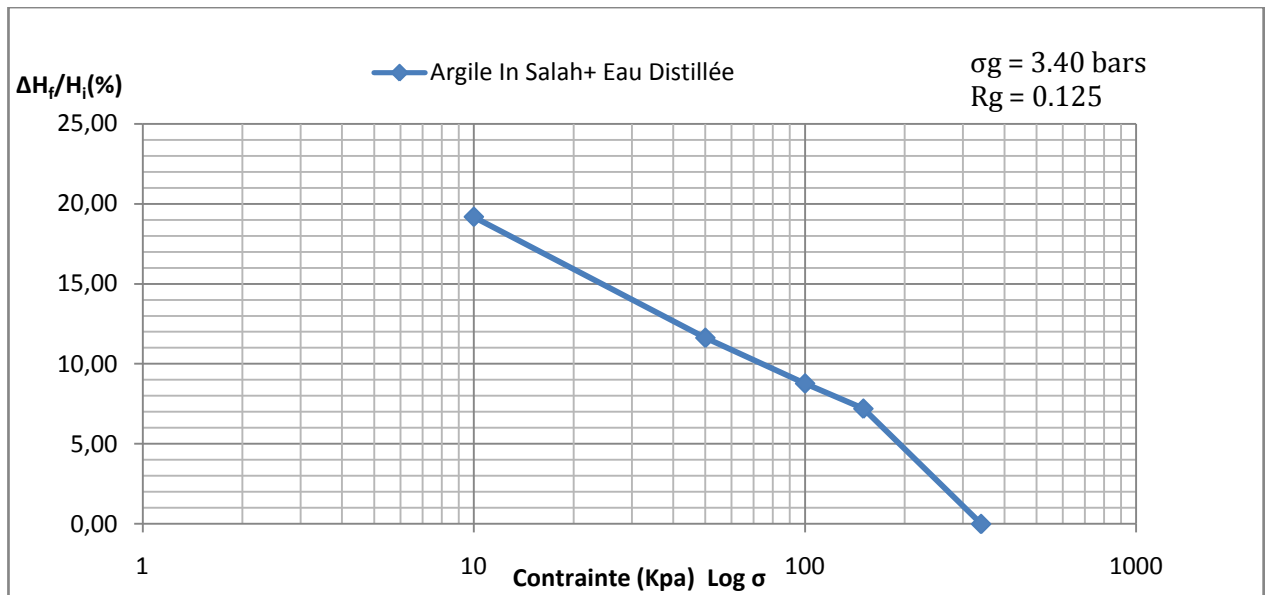


Figure V-17: La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant l'eau distillée

Le gonflement de l'argile d'In Salah en présence d'eau distillée a présenté une contrainte de gonflement de l'ordre de 3.40 bars, avec un taux de gonflement de l'ordre de 19.18 %. Le rapport de gonflement de cet essai est de 0.125.

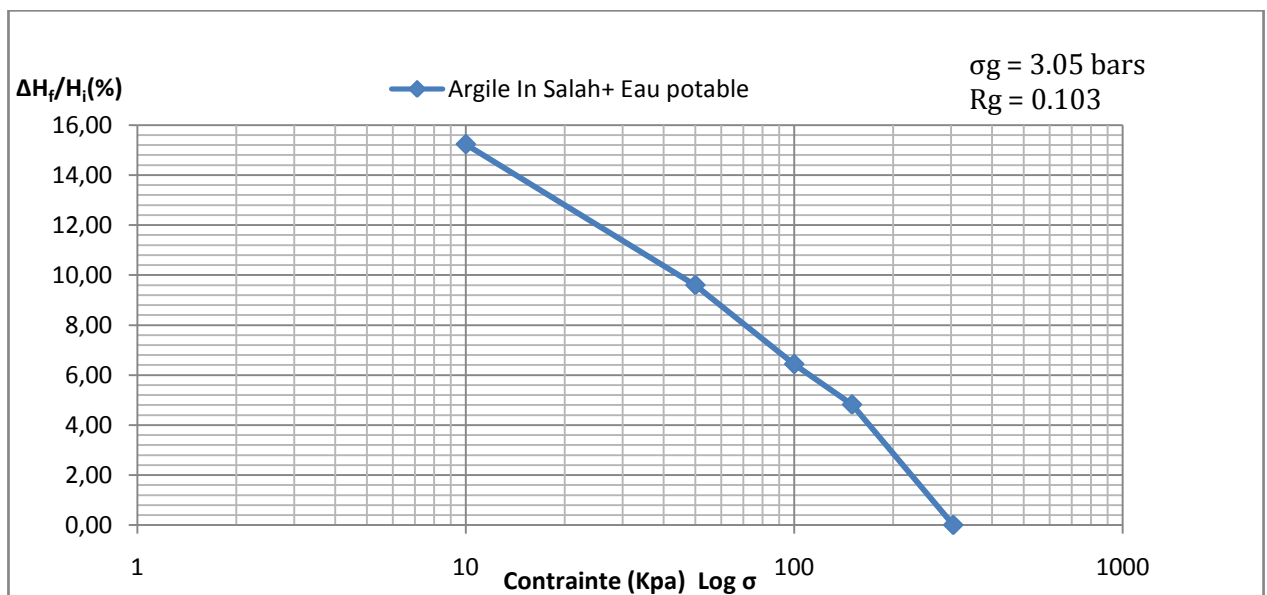


Figure V-18 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant l'eau Potable

Le gonflement de l'argile d'In Salah en présence de l'eau potable (eau de robinet) a présenté une contrainte de gonflement de 3.05 bars, avec un taux de gonflement de l'ordre de 15.24 %. Le rapport de gonflement de cet essai est de 0.103.

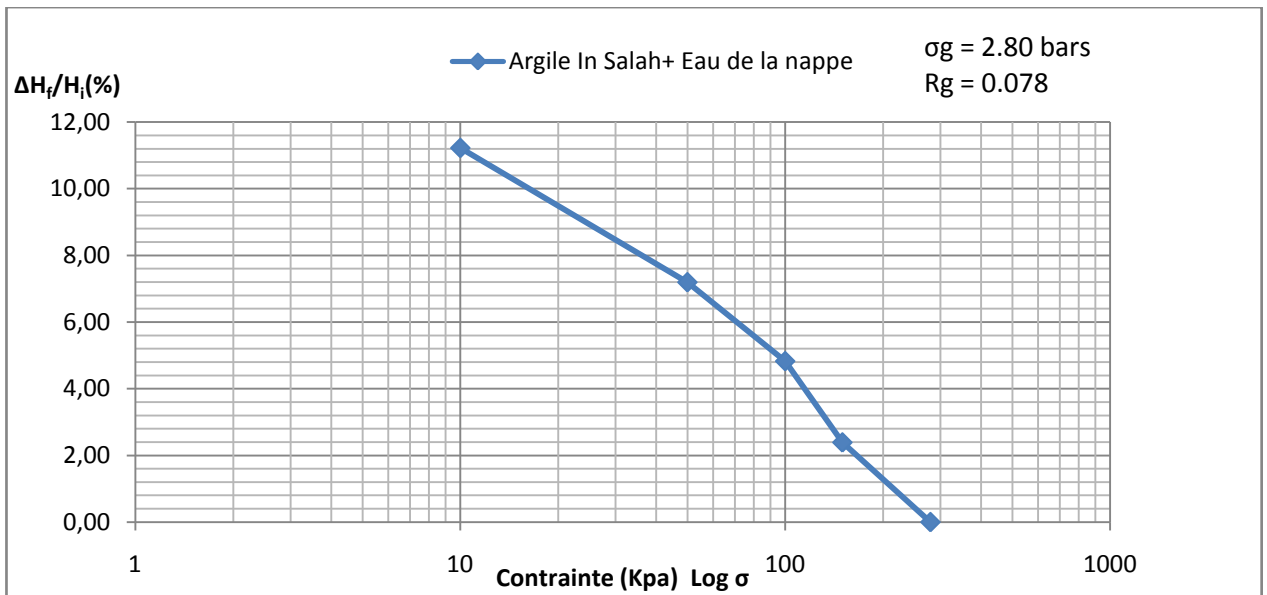


Figure V-19 : La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant l'eau de la nappe

Le gonflement de l'argile d'In Salah en présence de l'eau de la nappe (eau de drainage) a présenté une contrainte de gonflement de 2.80 bars, avec un taux de gonflement de l'ordre de 11.22 %. Le rapport de gonflement de cet essai est de 0.078

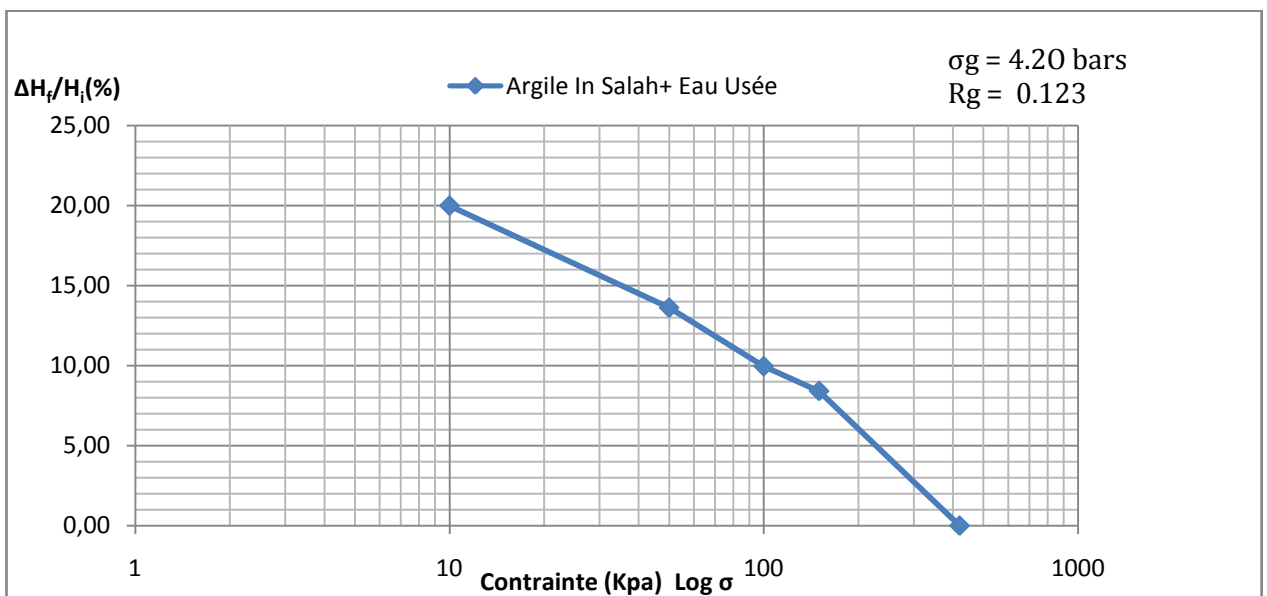


Figure V- 20: La courbe de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant l'eau usée

Le gonflement de l'argile d'In Salah en présence de l'eau usée a présenté une contrainte de gonflement de 4.20 bars, avec un taux de gonflement de l'ordre de 19.99 %. Le rapport de gonflement de cet essai est de 0.123.

Les caractéristiques obtenues pour cette argile peuvent être résumées dans le tableau suivant :

Tableau V-2 : Caractéristiques de gonflement de l'échantillon d'In Salah

Argile d'In Amenas			
Type d'eau utilisée	Taux de gonflement $\Delta H_f/H_i$ (%)	Contrainte de Gonflement σ_g (bars)	Rapport de gonflement
Eau distillée	19.18	3.40	0.125
Eau potable	15.24	3.05	0.103
Eau de la nappe	11.22	2.80	0.078
Eau usée	19.99	4.20	0.123

La figure suivante présente les quatre courbes de gonflement de l'argile d'In Salah en utilisant les quatre types d'eau

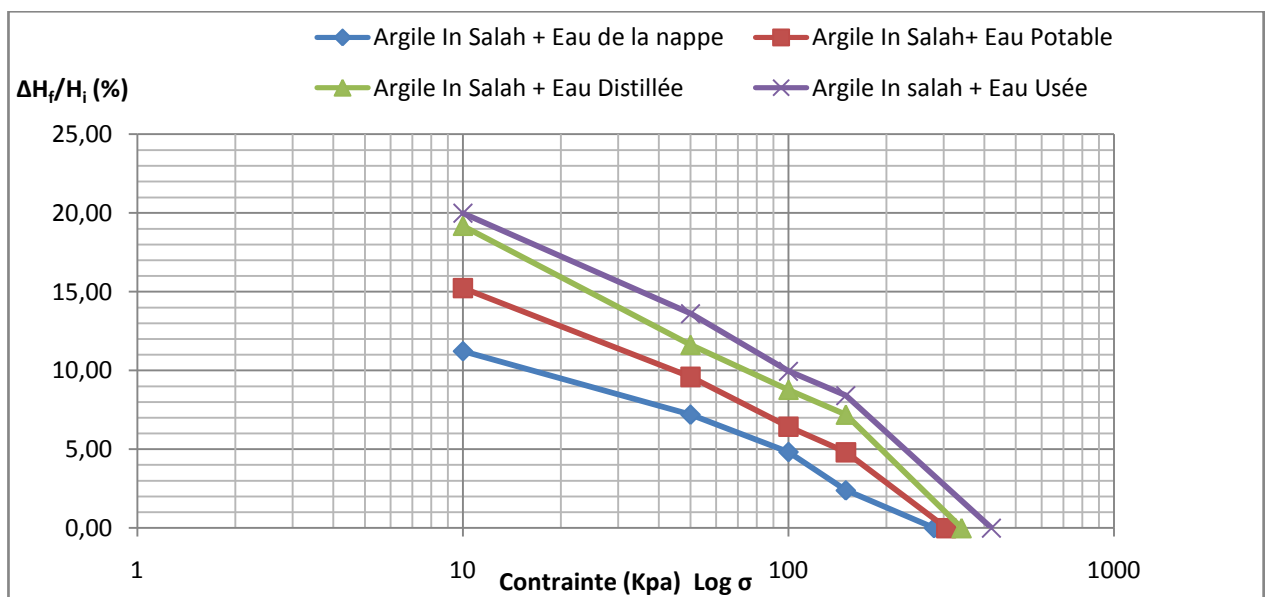


Figure V- 21: Les courbes de gonflement à l'oedomètre sur l'argile d'In Salah en utilisant les quatre eaux

Les histogrammes suivant, représentent l'évolution des caractéristiques de gonflement en fonction de la nature d'eau.

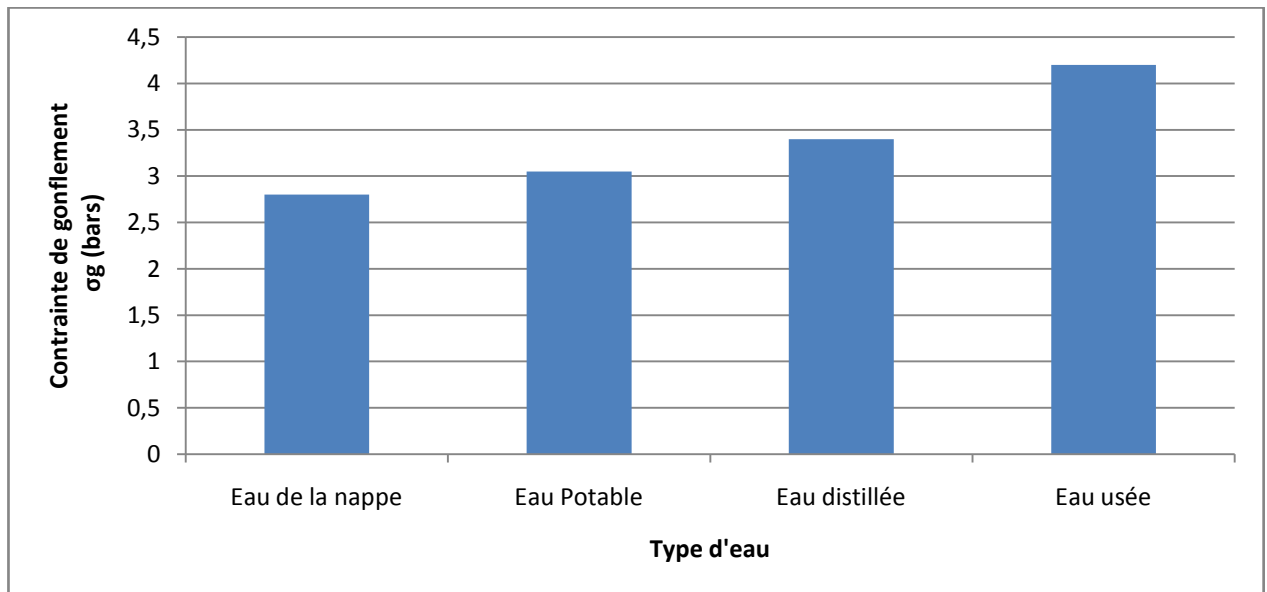


Figure V-22: Histogrammes montrant l'évolution de la contrainte de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Salah)

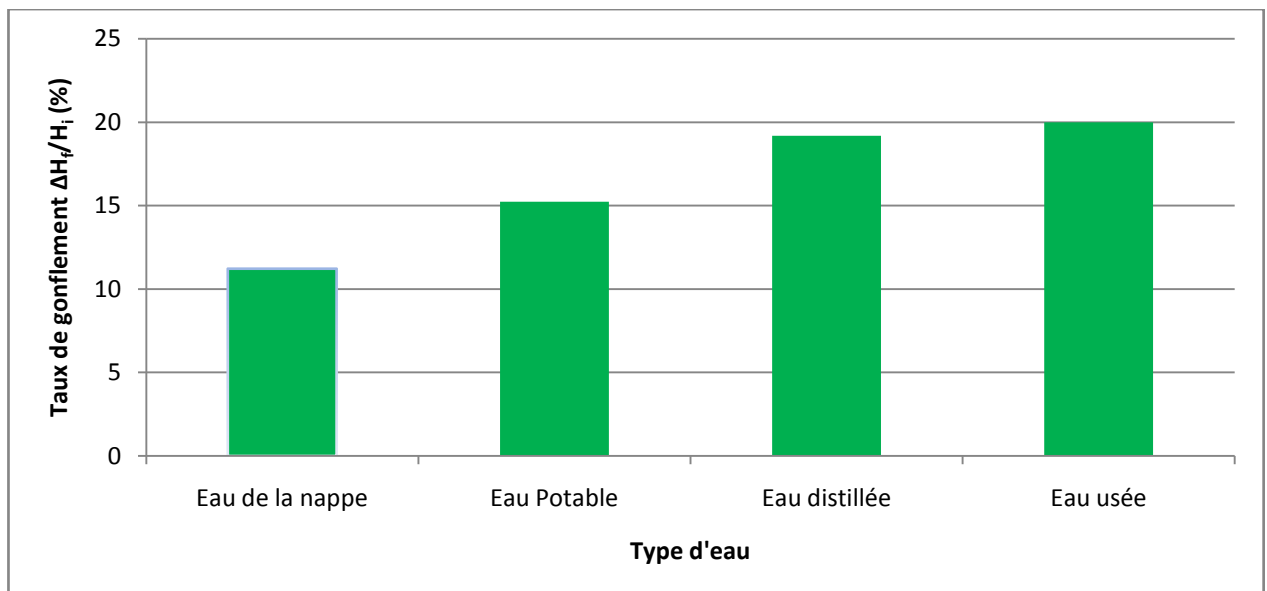


Figure V-23: Histogrammes montrant l'évolution du taux de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Salah)

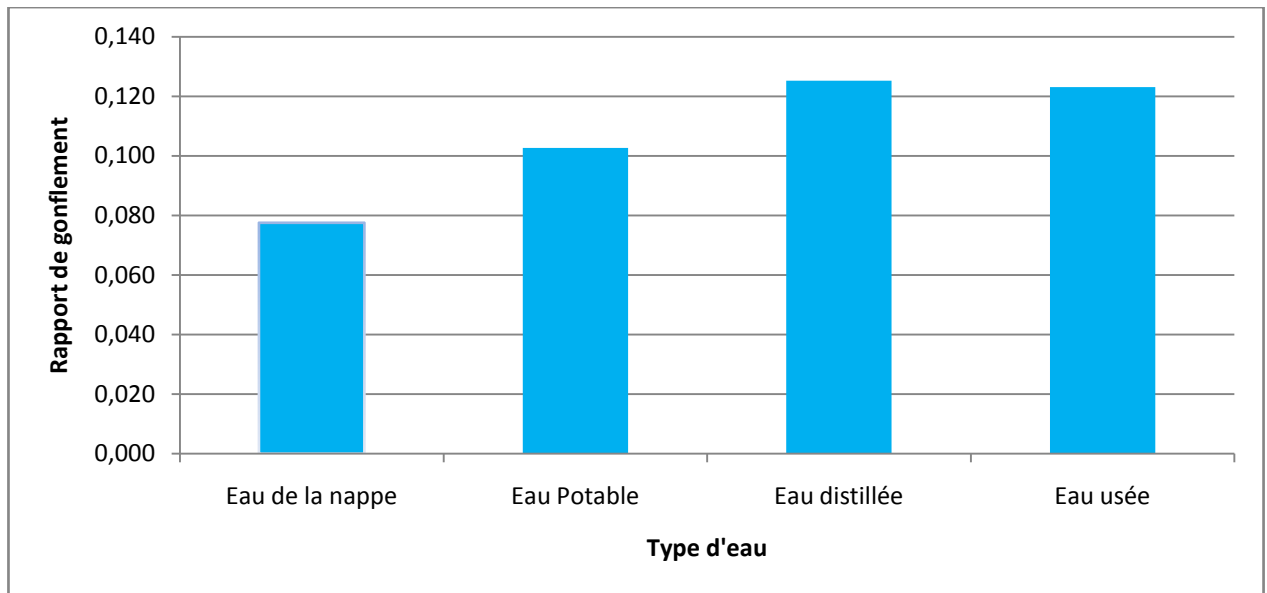


Figure V-24: Histogrammes montrant l'évolution du rapport de gonflement en fonction de type d'eau (Argile In Salah)

Ces résultats nous a permis de constater que la contrainte de gonflement est passée de 2.80 bars lorsqu'on utilise l'eau de nappe, à 4.20 bars en utilisant l'eau usée. D'autre part, le taux de gonflement varie entre 11.22% dans le cas d'eau de la nappe, et 19.99% pour l'eau usée. Cela montre une influence de la nature d'eau sur les deux paramètres.

Le rapport de gonflement est de 0.078 lorsqu'on utilise l'eau de la nappe, est 0.103 pour l'eau potable et il est au voisinage de 0.124 pour l'eau usée et l'eau distillée.

Les mêmes observations faites pour l'argile d'In Amenas ont été constatés pour l'Argile d'In Salah :

Le potentiel de gonflement n'est pas proportionnel à la pression de gonflement

Les caractéristiques de gonflement les plus faibles ont été obtenues lorsqu'on utilise l'eau de la nappe (eau à forte conductivité), par contre ils sont plus importantes pour l'eau distillée (eau à faible conductivité)

L'eau usée a fait l'exception (eau à forte conductivité donne un gonflement plus important), ceci peut être justifié par la présence d'autres éléments qui sont spécifiques à l'eau usée.

4.2.2. Etude de cinétique de gonflement :

Les essais réalisés sur l'argile d'In Salah ont permis de tracer les courbes suivantes :

a) L'évolution de gonflement dans le temps en fonction de la contrainte appliquée :

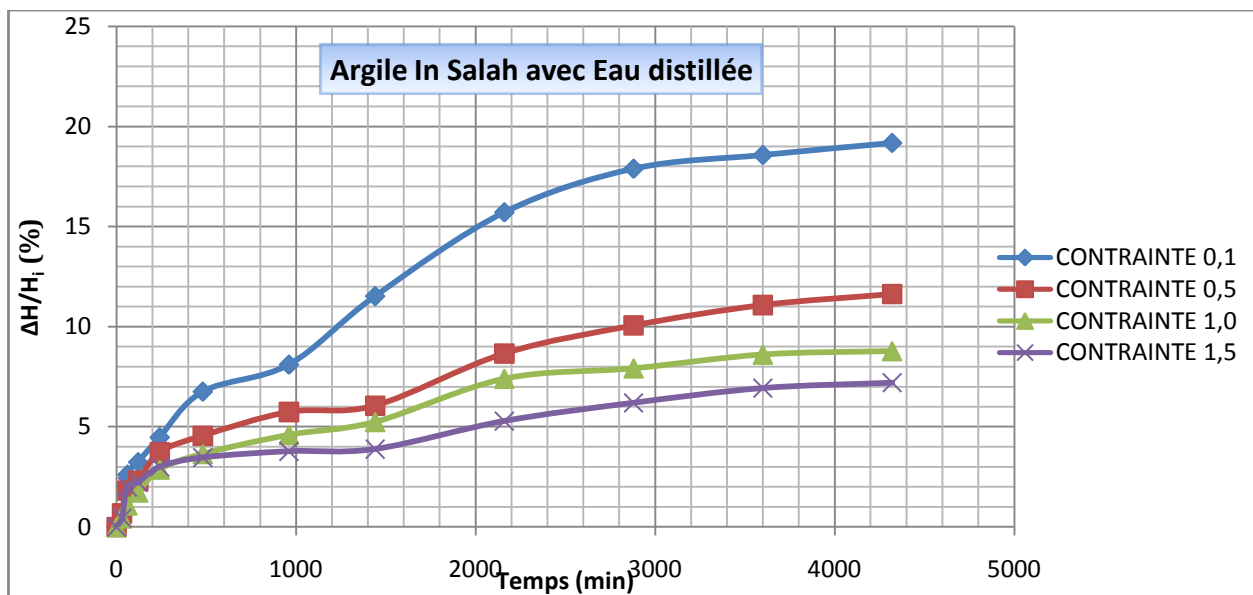


Figure V-25 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Salah sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau distillée

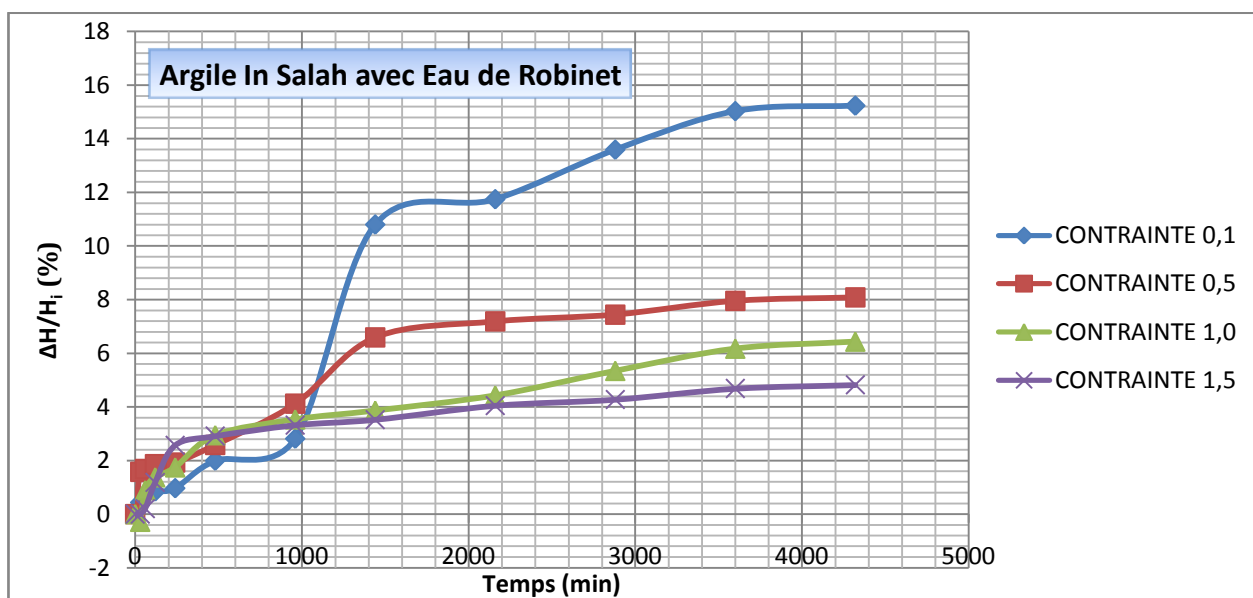


Figure V-26: développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Salah sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau de la nappe

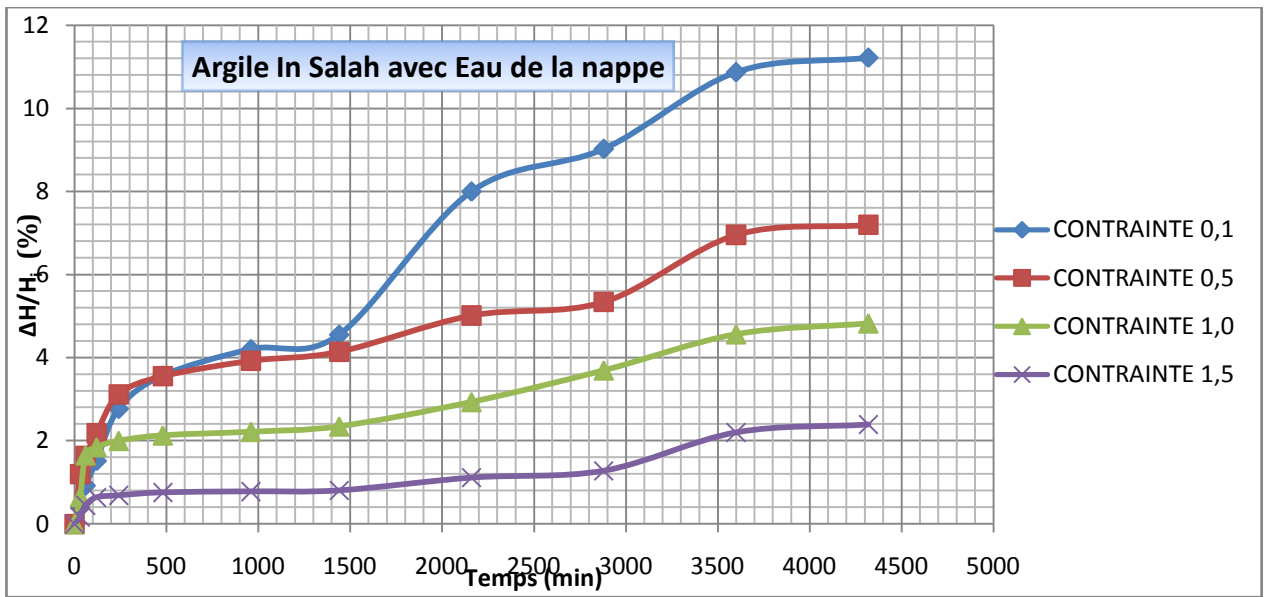


Figure V-27: développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Salah sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau de la nappe

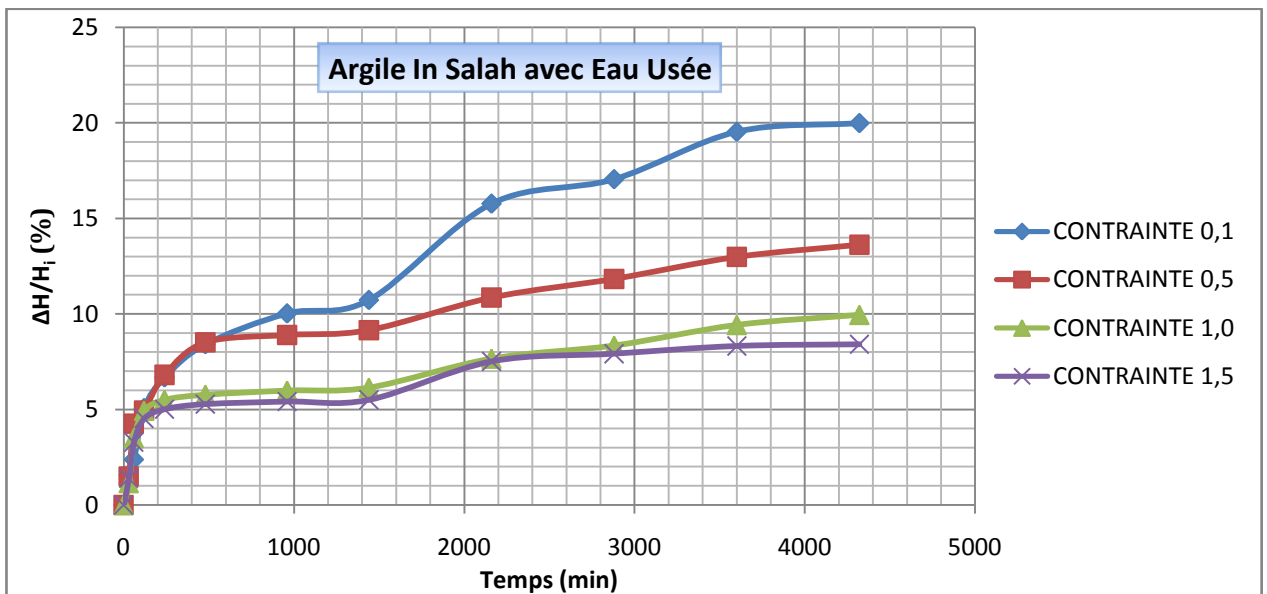


Figure V-28 : développement de gonflement dans le temps de l'argile d'In Salah sous l'effet de 04 contraintes en utilisant l'eau usée

Pour l'argile d'In Salah, on remarque que le début de stabilité de gonflement n' a pas été observé pour les quatre types d'eau qu'à partir de 3600 minutes et cela pour les différents cas de chargement.

b) L'évolution de gonflement dans le temps en fonction de la nature d'eau (pour les quatre contraintes appliquées) :

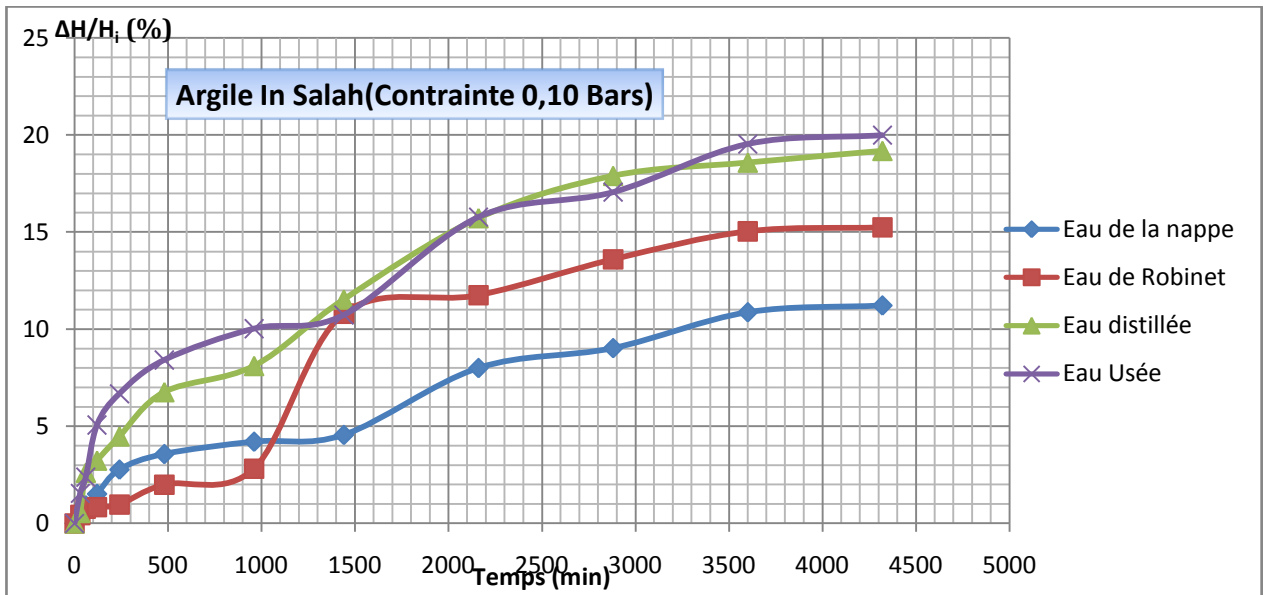


Figure V-29 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Salah) sous une contrainte : 0.10 bars

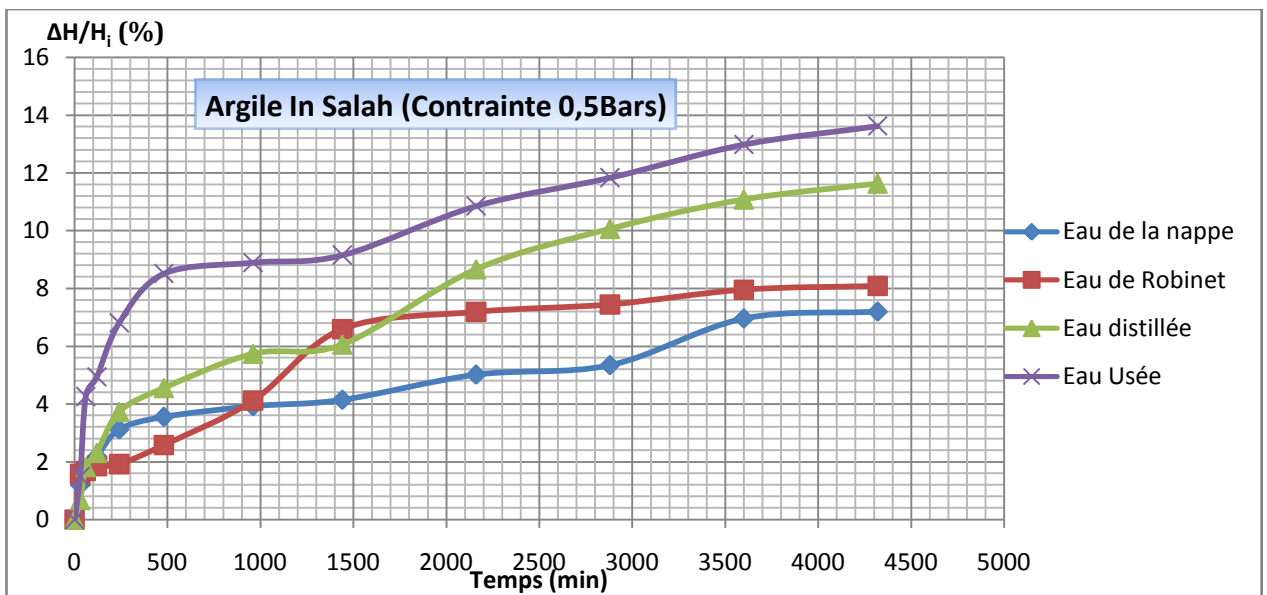


Figure V-30: Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Salah) sous une contrainte : 0.50 bars

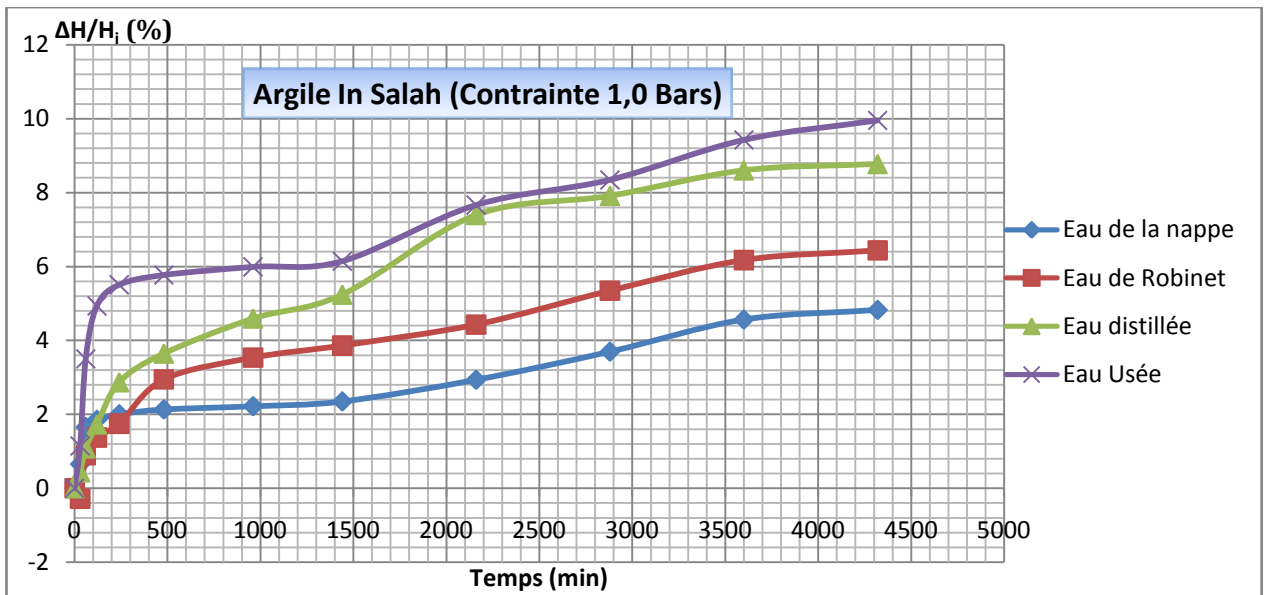


Figure V- 31: Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Salah) sous une contrainte : 1.0 bars

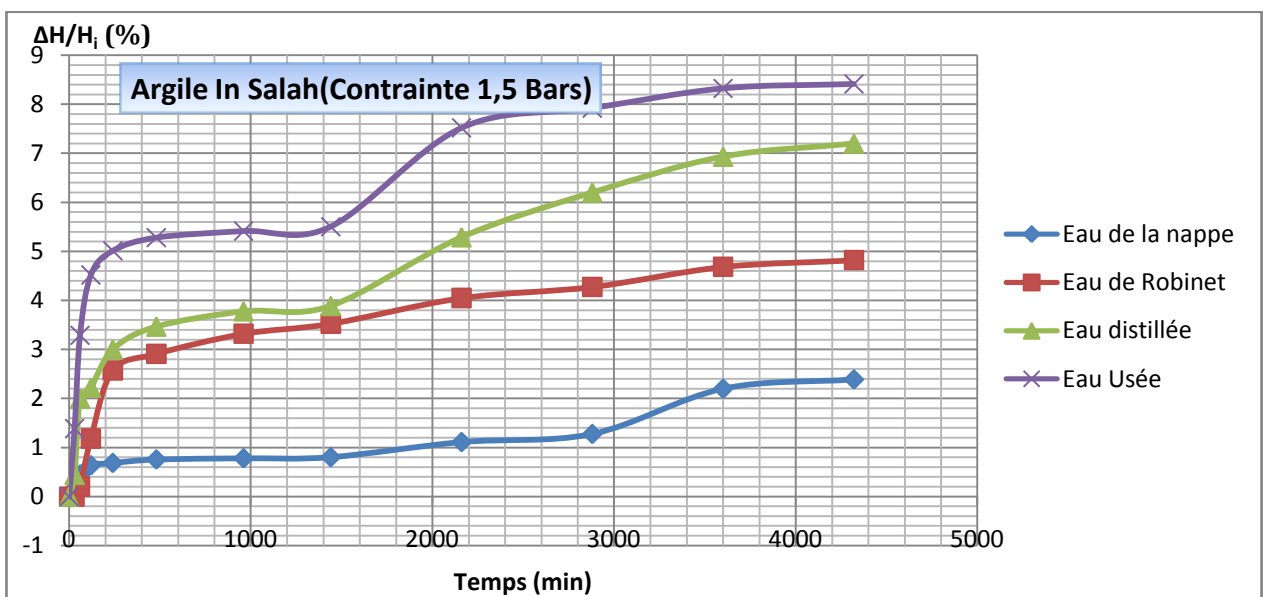


Figure V-32 : Comparaison de la cinétique de gonflement pour les différents types d'eau (Argile In Salah) sous une contrainte : 1.50 bars

On remarque que pour cette argile lorsqu'on applique des faibles contraintes les courbes se chevauchent dans le début du chemin de gonflement et la distinction entre les courbes n'est obtenue qu'après 72 heures. Par contre lorsqu'on applique des contraintes élevées la distinction entre les courbes est observée dès le début de chemin de gonflement.

Ces observations montrent que l'évolution de gonflement dans le temps est une fonction à plusieurs variables dont la nature d'eau (C'est-à-dire que l'argile ne gonfle pas de même vitesse lorsqu'on change de l'eau).

5. Conclusion:

Les résultats des essais réalisés sur les deux types d'argile ont montré que la nature d'eau est un facteur influençant le phénomène de gonflement ;

À faibles contraintes l'utilisation de l'eau de la nappe (eau de drainage) présente des déformations verticales faibles par rapport aux autres notamment l'eau usée, ceci peut être expliqué par le sens physico—chimiques de gonflement.

En augmentant la contrainte on remarque que les déformations verticales des échantillons pour les différentes eaux se rapprochent, ce phénomène peut être dû à l'interaction entre les deux sens de gonflement (mécanique et physico-chimique).

Les caractéristiques de gonflements en l'occurrence, la pression et le taux de gonflement dépendent de la nature d'eau, ils sont les plus faibles en utilisant l'eau de la nappe et deviennent plus importants en utilisant d'autres types d'eau, les valeurs maximales ont été obtenues pour les eaux usées.

Dans les quatre types d'eau utilisés on peut remarquer que l'un des facteurs qui a influencé les caractéristiques de gonflement des argiles est la conductivité ; pour l'eau ayant une conductivité élevée (eau de la nappe), les caractéristiques de gonflement sont les plus faibles, par contre pour l'eau présentant une faible conductivité (l'eau distillée), les caractéristiques de gonflement sont plus importantes. L'exception a été faite pour l'eau usée que malgré sa conductivité élevée, elle présente un gonflement important. Ceci peut être lié aux éléments de pollution dans l'eau usée notamment l'ammonium (NH_4^+)

La cinétique de gonflement de sa part a montré que la nature d'eau a une influence sur le développement de déformation dans le temps, en effet, selon le type d'argile le gonflement primaire n'est pas toujours influencé par la nature d'eau, par contre l'effet de la nature d'eau pendant le gonflement secondaire est toujours remarquable .

La Stabilité de gonflement durant les essais de laboratoire est une fonction de la nature de l'eau utilisée et de certaines caractéristiques minéralogiques de l'argile.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La complexité du phénomène de gonflement des argiles impose des travaux de recherche très particuliers qui traitent chaque facteur influençant ce phénomène d'une manière précise. C'est dans ce contexte que le présent travail est considéré comme une contribution à l'étude de gonflement des argiles en fonction de la nature d'eau.

La recherche bibliographique a permis de comprendre la texture microscopique et macroscopique des argiles ainsi que leur composition minéralogique. Elle a permis également de mettre en évidence la complexité de phénomène de gonflement et d'identifier les différents paramètres que le gouverne.

Notre travail s'intéresse à l'étude de l'effet de la nature d'eau telle qu'elle existe dans la nature sur le phénomène de gonflement d'une manière général,

L'étude expérimentale de notre travail a consisté à l'étude de gonflement de deux types d'argiles différentes ; argile de In Amenas très connue par son potentiel de gonflement élevée, et l'argile d'In Salah qui a provoqué des problèmes de gonflement très consistants ;

L'identification des matériaux étudiés, a permis de déterminer leurs caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques, ce qui a montré que les deux matériaux présentent des bons exemples pour la présente étude ;

Quatre types d'eau ont été choisis pour réaliser les expériences au laboratoire, il s'agit de l'eau distillée comme témoin, l'eau potable (eau de robinet), l'eau de la nappe phréatique (eau de drainage) et l'eau usée ;

L'étude de gonflement au laboratoire a été faite à l'aide d'oedomètre, sur des échantillons intacts avec une teneur en eau initiale nulle. Lors du prélèvement des échantillons toutes les précautions ont été prise pour que l'échantillonnage soit représentatif ;

Le type d'essai choisi pour l'étude de gonflement est la méthode de gonflement à l'oedomètre selon la procédure de détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes en parallèle

Les mesures des paramètres de gonflement ont permis de déterminer le taux et la pression de gonflement des deux types d'argile en utilisant les quatre types d'eau, toute en essayons de garder les mêmes conditions de l'essai (changer un seul paramètre qui est l'eau) ;

Les expériences au laboratoire ont permis aussi d'analyser le développement de gonflement dans le temps en fonction de la nature d'eau et sous l'effet de différentes contraintes.

Les résultats obtenus ont montré dans l'ensemble que les caractéristiques de gonflement mesurées pour les deux types d'argile changent en fonction de la nature d'eau, ils ont donné les valeurs les plus faibles pour le cas de l'eau de la nappe (eau à forte conductivité), et les valeurs maximales ont été obtenus en utilisant l'eau usée ;

Les déformations verticales mesurées à faibles contraintes ont montré que pour les quatre types d'eau les valeurs sont dispersés ce qui montre l'influence de la nature d'eau sur cette caractéristique, par contre en augmentant la contrainte nous avons remarqué que les valeurs de déformation se rapprochent.

Le développement de gonflement dans le temps (cinétique de gonflement) a montré que pour les faibles contraintes (notamment 0,10 bars), le gonflement primaire n'a pas été influencé par la nature d'eau et l'influence n'a été constaté que pendant le gonflement secondaire. D'autre part la stabilité de gonflement pour ces faibles contraintes a montré qu'elle est influencée par la nature d'eau ;

En augmentant la contrainte appliquée sur l'échantillon d'argile on remarque bien l'influence de la nature d'eau sur la cinétique de gonflement, elle est très lente pour l'eau de la nappe par rapport à l'eau usée.

Les essais réalisés au laboratoire ont montré que pour les deux types d'argile étudiés, l'ordre de l'influence de la nature d'eau sur les caractéristiques de gonflement (Pression et taux de gonflement) est le même : les caractéristiques les plus faibles ont été obtenus en utilisant l'eau de la nappe, l'utilisation de l'eau potable a montré une légère augmentation, l'eau distillée a encore augmenté les paramètres et les valeurs maximales sont obtenue par l'eau usée. Par contre la cinétique de gonflement n'est pas identique pour les deux type d'argile ce qui montre qu'elle est fonction de plusieurs autres paramètres.

En fin, on peut conclure à travers les résultats obtenus que la nature d'eau est un paramètre important dans l'étude du phénomène de gonflement, il a été remarqué que les eaux chargées influent beaucoup plus sur le gonflement que l'eau distillée, d'autre part l'eau usée par sa spécificité (éléments de pollution) a montré qu'elle favorise le phénomène de gonflement.

Ce modeste travail reste une simple contribution à l'étude de ce phénomène assez complexe, comme le cas dans toute recherche, les résultats obtenus sont encore à affiner et à compléter.

Recommandations

Au terme de ce modeste travail, certaines recommandations s'imposent :

- L'étude de gonflement en laboratoire d'une argile, doit prendre en considération les conditions de site notamment les eaux qui peuvent être en contact avec cette argile pour aboutir à des résultats significatifs;
- Le chargé de l'étude géotechnique d'un site doit préciser l'effet de chaque type d'eau existant sur l'argile, afin de permettre au concepteur de prendre les dispositions nécessaires (exemple : protection contre certaines fuites d'eau) ;

Perspectives

Le présent travail consiste à l'étude de l'influence de la nature d'eau sur le gonflement d'argile sans tenir en considération la composition chimique de l'eau. Pour une bonne maîtrise de l'influence de l'eau sur le phénomène de gonflement il est important d'étudier l'influence des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau sur le gonflement.

D'autre part l'effet des eaux usées sur le gonflement à notre avis reste encore une opportunité de recherche très importante.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] **AFNOR**, « Norme française sol: reconnaissance et essais»:
NFP 94- 041: Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide
NFP 94- 050: «Détermination de la teneur en l'eau pondérale des matériaux-
Méthode par étuvage».
NFP 94- 051: Détermination des limites d'Atterbeg la limite à la coupelle – limite de
plasticité au rouleau.
NFP 94- 057: «Analyse granulométrique des sols par sedimentométrie ».
NFP 94- 068: «Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la
tache ».
NFP 94- 091: «*Essai de gonflement à l'oedomètre » détermination des déformations par
chargement de plusieurs éprouvettes.*
- [2] **Azzouz F.Z** 2006, Contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de
la région de Tlemcen, thèse de magistère Université Boubaker Belkaid Tlemcen
- [3] **Bellatrache Y.** 2012, Comportement des argiles naturelles et traitées d'Ain Amenas en fonction de la
teneur en eau, thèse de magistère Université Kasdi Merbah Ouargla
- [4] **BENGRAA L.** (2004) Contribution a l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de
sable : *application aux sols d'Oran*, thèse de magistère de l'Université des sciences et de la
technologie Mohamed Boudiaf Oran .
- [5] **Bishop A.W.** (1960). The measurement of porepressure in the axial test.
- [6] **Bolt G.** 1956, Physico-chemical analysis of the compressibility of clay géotechnique ;
- [7] **Briant J.** Institut français de pétrole (1968), Pression de gonflement des argiles mesure et signification,
III^{ème} colloque l'A.R.T.F.P .
- [8] **Bultel F.** , (2001); «*Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des
revêtements des tunnels*». Thèse doctorat l'école nationale des ponts et chaussées.
- [9] **Chaillers, S. Hennin, S. Rautureau, M.** (1982), Minéralogie des argiles : structure et propriétés
physico-chimiques, T1. Edition Masson et INRA. Paris
- [10] **Chen, F. H.** (1988). Foundations on expansive soils, Developments in geotechnical engineering, vol.54
Elsevier publishing co. Amestrdam.
- [11] **Cuisinier, O.** (2002). Comportement hdrodynamique des sols gonflants compactés. thèse de doctorat
à l'institut national polytechnique de Lorraine France.
- [12] **Derriche, Z. Kebaili, M.** (1998) . Prévion du gonflement des argiles d'In Amenas. Bulletin de
laboratoires des ponts et chaussée Nov. Dec. 1998.

- [13] **Didier G.(1972)** . Gonflement cristallin et macroscopique des montmorillonites : Prévion : Thèse de docteur ingénieur, Université C. Bernard Lyon.
- [14] **DJEDID A.** , L'Identification des sols gonflants : Pour une démarche unifiée 24ième Rencontres Universitaires de Génie Civil ,*Université Aboubekr Belkaid Tlemcen.*
- [15] **GAOMBALET J.(2004)** Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage, thèse de Doctorat de l'école polytechnique paris.
- [16] **GUEDDOUDA M.K (2005)**, Stabilisation des argiles gonflantes par ajout de sable de dune Cas : Région de Laghouat, thèse de magistère de l'*Universtié des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf Oran .*
- [17] **Hafsi A.(1993)**, Théorie de la double couche et gonflement des argiles non saturées, Euromech colloquim N° 290 :Mechanics of swelling, rhods, Greece.
- [18] **Hafsi A.(1996)**, Contribution à la modélisation numérique et expérimentale du gonflement des argiles non saturées , application aux argiles d'In-amenas et de Touggourt, thèse de magistère de l'école nationale des Travaux Publics Alger.
- [19] **HARRAT M.** (2007), Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique, thèse de magistère à l'université Kasdi Merbag Ouargla.
- [20] **Holtz, W.G. et Gibbs, H.J.** (1991). Introduction à la géotechnique Traduit par Lafleur, J. édition de l'école polytechnique de Mottréal, Canada.
- [21] **KONAN K. L.** (2006), Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium, thèse de Doctorat de l'université de limoges
- [22] **KORMI T.** (2003), Modélisation numérique du gonflement des argiles non saturées, thèse de doctorat à l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [23] **KOULOUGHLI S.** (2007), étude expérimentale des mélanges sable bentonite, thèse de Doctorat de l'Université Mentouri Constantine.
- [24] **Madsen F. T.(1979)** Determination of swelling pressure of clays tones and marlstones using mineralogical. data 4th International congress on rock mechanics Monterey.
- [25] **MEKKI L.** Méthodologie d'étude et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins Soumis à des cycles de sécheresse prolongée (application aux argiles expansives de M'sila) thèse de magistère de l'Université de M'sila
- [26] **Millot G.** (1964), Géologie des argiles. Edition Masson Paris.
- [27] **NGUYEN PHAM P. T.** (2008) Étude en place et au laboratoire du comportement en petites déformations des sols argileux naturels, thèse de doctorat à l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [28] **NOWAMOOZ H.** (2007), Retrait/Gonflement des sols argileux compactés et naturels, thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de Lorraine.

- [29] **Philipponnat, G., Huber, B.**(1997) Fondations et ouvrages en terre. Edition Eyrolles.
- [30] **Serratrice J.F.** (1996). Les essais de gonflement. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussée 204 Juillet-Aout . 1996.
- [31] **Sridharan A. et Jaydeva M.S.** (1982) Double layer theory and compressibility of clays geotechnical
- [32] **TAS.M** (1992) « Influence des procédures expérimentales sur l'estimation en laboratoire des paramètres de gonflement des argiles expansifs» thèse de magister à l'école nationale polytechnique France.
- [33] **Wakim J,** (2005); «*Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses*» T h è s e doctorat de l'école nationale supérieure des mines de Paris France.