RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE, DE LA GEOGRAPHIE
ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

N° de série :
N° d'ordre :
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
THESE
PRESENTEE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

Thème:

DOCTORAT ÈS/SCIENCES

MINERALOGIE DES ARGILES ET PHENOMENE DE RETRAIT-GONFLEMENT DANS LE BASSIN DE MILA (NORD CONSTANTINOIS)

Présenté par :

ATMANIA DJAMEL

Thèse soutenue le 25/11/2010 devant le jury composé de :

M. AMIRECHE Hamza- Professeur - (Université Mentouri Constantine)	Président du jury
M. BENAÏSSA Abdelkader – Maître de Conférences « A » – (U. M. Constantine	e) Rapporteur
M. ZENIR Abdelmalek – Professeur – (Université de Jijel)	Examinateur
M. BELOUAR Abdelghani – Maître de Conférences « A » – (U.M. Constantine)	Examinateur
M. BOUMAZBEUR Abderrahmane – Maître de Conférences « A » – (U. Tébes	sa) Examinateur

REMERCIMENTS

Au terme de ce travail, mes remerciements s'adressent tout d'abord à mon Directeur de thèse Monsieur Abdelkader Benaïssa, Maître de Conférences au Département des Sciences de la Terre et membre du Laboratoire de Recherche Matériaux et Durabilité des Constructions à l'Université Mentouri Constantine pour ses conseils judicieux et pour la confiance et la liberté qu'il m'a accordée.

Je souhaite tout particulièrement remercier et exprimer toute ma gratitude à Monsieur Mounir Bouassida Professeur au Département de Génie Civil de L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis et Vice-président de la Société Internationale de la Mécanique des Sols et de la Géotechnique d'Afrique, pour l'honneur qu'il m'a accordé en acceptant de m'accueillir dans son unité de recherche pendant une période de onze mois. Malgré ses lourdes tâches, il n'a jamais cessé de m'aider et de m'orienter. La clarté de ses raisonnements scientifiques, ses qualités pédagogiques, son apport scientifique et son soutien ont été des facteurs déterminant quant à la réussite de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également au Professeur Nathalie Fagel, Chef de Travaux au Département de Géologie, «Unité de Recherche Argiles et Paléoclimats » à l'Université de Liège, pour m'avoir accordé deux séjours (sur deux périodes en octobre – novembre 2007 et 2008) dans son unité de recherche. Ces stages m'ont permis d'acquérir un certain nombre de techniques d'analyse : par rayons X, microscopie à balayage électronique et au microscope polarisant.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury :

Monsieur Hamza Amireche, Professeur à l'Université Mentouri (Constantine), pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Monsieur Abdelmalek Zenir, Professeur à l'Université de Jijel.

Monsieur Abdelghani Belouar, Maître de Conférences « A » – (Université Mentouri Constantine)

Monsieur Abderrahmane Boumazbeur, Maître de Conférences « A » – (Université de Tébessa) pour avoir bien voulu faire parti du jury.

Lors de l'élaboration de l'étude minéralogique et sédimentologique, cette thèse a bénéficié d'une collaboration avec des Professeurs de la faculté des Sciences de Tunis. Il m'est agréable, à cet effet, d'exprimer mes respectueux sentiments de gratitude et de reconnaissances les plus distinguées à Monsieur Salah Bouhlal, Professeur au département de Géologie à la faculté des Sciences de Tunis, pour ses recommandations d'interprétation des diffractogrammes de la technique des rayons X.

Un merci particulier à Mr Azzedine Mebarki, Maître de Conférences à l'Université de Constantine pour son amicale collaboration concernant l'acquisition et l'interprétation des données hydro climatologiques du Bassin Kébir Rhumel.

Je souhaite également remercier les laboratoires, sociétés et bureau d'études géotechniques, principalement le laboratoire de Géomatique (topographie, photogrammétrie, Systèmes d'Informations Géographiques SIG, Télédétection et

Cartographie numérique) de l'ENIT à Tunis, Mr. Noomane Rebaï, Achour Hammadi, Anis Manai, sans oublier LTPE de Constantine, l'antenne de Tébessa, l'antenne de Mila, GEOCONSEIL. J'exprime, en effet, mes respectueux sentiments de gratitudes et de reconnaissance au directeur de LTPE de Tébessa qui m'a permis d'effectuer les essais d'identification et de caractérisation géotechnique au sein de son laboratoire, et particulièrement à Monsieur Laid et El Hadi, techniciens au laboratoire.

Un petit clin d'œil à mes amis notamment, Med Laïd Hemila, Omar Guefaifia, Fahdi, Baali, Rouabhia, Gouaidia, enseignants à l'Université de Tébessa, pour le soutien moral qu'ils m'ont apporté.

Bien entendu cette liste n'est pas exhaustive, mes remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribués à la réussite de ce travail.

Enfin j'ai une pensée pour tous ceux qui m'ont entouré au quotidien durant mes années de thèse, mon père, ma mère, ma femme, mes frères et sœurs et mes trois enfants Bouthaïna, Sid-Ali et Abdelkader. Je voudrais les remercier du fond du cœur de m'avoir donné sans cesse leur soutien et leur amour.

MINERALOGIE DES ARGILES ET PHENOMENE DE RETRAIT-GONFLEMENT DANS LE BASSIN DE MILA (NORD CONSTANTINOIS)

منخص: من بين الظواهر التي تؤثر في خصائص التربة الفيزيائية والميكانيكية، لاحظنا خلال بحثنا هذا أن ولاية ميلة الواقعة في الشمال الشرقي للجزائر والتي تبعد على مدينة قسنطينة بمسافة 50 كيلومتر نحو الغرب، تتميز بتربة طينية سطحية واسعة الانتشار لها قابلية التقلص والتورم. هذه الظاهرة لها تأثيرها السلبي على التنمية المستدامة والمنشآت القاعدية ويرجع السبب الرئيسي للتذبذب المسجل في كميات الأمطار الموسمية المتساقطة والتباين في در جات الحرارة اللذان يحددان طبيعة المناخ الغير مستقر من شمال الولاية حتى جنوبها ومن شرقها لغربها.

لوضع التدابير اللازمة لمنع مثل هذه الكوارث، نقدم في هذا العمل، منهجا وتطبيقا نموذجيا بواسطة خرائط رقمية بالحاسوب وبرامج إعلامية أعددت خصيصا لهذا الغرض، وأحسن مثال على هذه الطريقة ما هو معمول به حاليا من طرف مكتب البحث الجيولوجي والمنجمي في فرنسا حيث أن القارئ بإمكانه الرجوع للمراجع وتصفح مواقع الإنترنيت التي خصصت لدراسة الظاهرة وشرح المنهجية المتبعة لتحديد المناطق المتضررة ووضع خرائط جيونقنية متخصصة و على مستوى عال من الدقة لتمكين كل من له علاقة في هذا الميدان من استغلال المعلومات وأخذها بعين الاعتبار قبل الشروع في تخطيط وتهيئة الأراضي المخصصة للبناءات ومشاريع الهندسة المدنية تفاديا لظاهرة الانكماش أو تورم التربة الطينية.

بداية وفي نظرة وجيزة يمكن القول أنه من الممكن في الجيولوجيا التطبيقية خاصة مع توفر الإمكانيات المخبرية والمعلوماتية، وضع خرائط تحدد الأماكن التي قد تشكل عبئا على المشاريع الهندسية وتقلل من مدة صلاحيتها وديمومتها خاصة مع ارتفاع تكاليف الإنجاز لكل مشروع. هذا الأسلوب يأخذ في الإعتبار ثلاث خصائص قابلة للقياس الكمي تتعلق أولا بطبيعة التربة والصخور، بنيتها المعدنية وخصائصها الجيوتقنية.

في المرحلة الموالية يجب وضع سلم ترتيبي لمدى قابلية التربة أو الصخور لتفاقم الظاهرة وذلك بوضع ثلاثة علامات لهذه المعايير التي تؤخذ بعين الإعتبار. مؤشر القابلية هو متوسط الدرجات التي تم الحصول عليها عن كل تشكيل طيني أو صلصال، والخريطة الناتجة تعبر عن مدى قابلية الطين لإحتواء الظاهرة مع وضع ترتيب لشدة القابلية من منخفضة, متوسطة, و عالية.

الكلمات الرئيسية: طين، قابلية التقلص والتورم، خرائط جيو تقنية، علم المعادن، ميلة.

Résumé: En Algérie, dans la wilaya de Mila, les argiles sensibles au phénomène retraitgonflement sont très répandues. Cette sensibilité remet en question la pérennité des constructions et de la voirie. Elle est amplifiée par les déficits pluviométriques saisonniers qui atteignent des ampleurs maximales.

Afin de développer des actions de prévention de ces sinistres, nous présentons, dans ce travail, une cartographie des zones susceptibilité au phénomène retrait-gonflement en adoptant une méthode mise au point par le B R G M pour cartographier plusieurs régions de France.

Cette méthode prend en compte trois caractéristiques quantifiables (lithologique, minéralogique et géotechnique) des formations argileuses identifiées dans le secteur d'étude. Chaque formation reçoit trois notes pour ces différents critères pris en compte. L'indice de susceptibilité constitue la moyenne des notes retenues pour chaque formation argileuse. La carte de susceptibilité est établie sur la base de cet indice avec trois classes : faible, moyenne, forte.

Mots clés: Argile, Retrait – gonflement, Susceptibilité, Cartographie, Minéralogie, Fondation, Mila.

Abstract: In Mila Province, Algeria (a.k.a Mila Wilaya), sensitive clays presenting shrinkage-

swelling phenomena are widespread, covering large areas. Due to this, constructions and

infrastructures sustainability built on such soils is questionable. Such clays sensitivity is

amplified by seasonal rainfall deficits which reaches extreme magnitudes. In order to develop

disasters' prevention measures, we present in this work, areas mapping susceptible to shrinkage-

swelling phenomenon by adopting a French method developed by B R G M. This method takes

into account three measurable characteristics: i.e. lithological, mineralogical and geotechnical, of

clayey formations identified in the studied sector. Based on these characteristics, three scores are

attributed for each formation. Then, the susceptibility index is the obtained score average for each

clayey formation.

The susceptibility map is established on this index basis with three classes: low, medium, high.

Keywords: Clay - Shrinkage-swelling - Susceptibility - Cartography - Mineralogy - Foundation

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	2
CHAPITRE 2 : GEOLOGIE DU BASSIN DE MILA	7
2.1 Cadre géologique générale	8
2.1.1 Domaine interne.	8
A- Les formations de l'Oligo-Miocène kabyle et les Olistostromes	9
B- Dorsale kabyle Formations de types flyschs	9
2.1.2 Domaine externe	10
2.1.2.1 Les unités ultratelliennes	11
2.1.2.2 Les unités telliennes	11
2.1.2.3 Les unités pénitelliennes	11
2.1.2.4 Domaine de l'avant pays	11
2.1.2.4.1 L'Avant pays allochtones	11
2.1.2.4.2 L'Avant pays autochtones	12
2.1.2.5 Les formations post-nappes	12
2.1.2.6 LES PHASES TECTONIQUES	14
2.1.2.6.1 Les phases tectoniques mésozoïques	14
2.1.2.6.1.1 La phase du Jurassique supérieur	14
2.1.2.6.1.2 La phase Anté-Sénonienne	14
2.1.2.6.1.3 Les phases tectoniques Tertiaires	14
2.1.2.6.1.4 La phase Fini Lutétienne	14
2.1.2.6.1.5 La phase Miocène	15
2.1.2.6.1.6 La Tectonique récente	15
2.2 Géologie du bassin de Mila.	16
2.3 Caractéristiques lithologiques des dépôts néogènes du bassin de Mila	17
2.3.1 Introduction	17
2.3.2 Description lithostratigraphique	17
2.4 Caractéristiques lithologiques des dépôts néogènes du bassin de Mila	21
2.5 Contexte géomorphologique	24
CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES ET	
HYDROGEOLOGIQUES DU BASSIN KEBIR RHUMEL	27
3.1 Introduction.	28
3.2 Aperçu morpho-structural du bassin Kébir Rhumel	28
3.3 Caractéristiques Morphométriques de l'ensemble du bassin Kébir Rhumel	29
3.4 Contexte hydrogéologique	30
3.5 Statistiques relatives au facteur pente	31
3.6 Réseau hydrographique	33
3.7 Types et densités de drainage	34
3.8 Climat et Végétation	37
3.8.1 Analyse des caractéristiques Climatiques	37
3.8.2 Pluviométrie	37
3.8.3 Température	38
3.8.4 Graphe Ombro-thermique	38
3 8 5 Répartition saisonnière des précipitations	40

3.8.6 Végétation	
3.9 Conclusion	
CHAPITRE 4: ÉTUDE MINERALOGIQUE ET GEOTECHNIQUE D	ES
ARGILES DE MILA	
4.1 Introduction	
4.2 L'observation de lames minces	
4.3 Effets de la Bioturbation sur les Propriétés Géotechniques des Sédiments	du
Bassin de Mila	
4.4 La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	
4.5 Analyses par Diffraction X. 4.5.1. Confection de la poudre totale désorientée et analyse diffractométric quantitative et semi-quantitative des minéraux argileux et non argileux	 que que
4.5.3. Confection de l'agrégat orienté (fraction inférieure à 2 microns) et analy diffractométrique quantitative (analyse complémentaire éventuelle)	•
4.6 Appareillage et méthode : Analyses minéralogiques par diffraction des rayons 4.6.1 Minéralogie totale	
4.6.2 Fraction argileuse	
4.6.3 Préparation pour analyse minéralogique par diffraction des rayons X	
4.6.3.1 Analyse de la minéralogie totale : préparation d'une poudre	
4.6.3.2 Analyse de la fraction argileuse < 2microns: préparation d'un agré	
orienté	_
4.6.3.3 Résultats des essais minéralogiques de rayons X (échantillon total)	
4.6.3.4 Résultats des essais minéralogiques de rayons X (fraction argileuse)	
4.7 Mécanisme de retrait-gonflement des argiles	
4.7.1 Résultats des différents sites étudiés	
4.7.1.1 Site 185 logements	
4.7.1.1.1 Situation du site	
4.7.1.1.2 Occupation des sols.	
4.7.1.1.2 Gecapation des sois	
4.7.1.2 R.N. 79 – Mila	
4.7.1.3 Site CW 52 ; Mila	
4.7.1.3.1 Coordonnées Lambert des points de sondages	
4.7.1.3.2 Essais d'identification	
4.7.1.3.3 Caractéristiques œdométriques	
4.7.1.4 Site Ferdjioua	••
4.7.1.5 Site de kherrouba	
CHAPITRE 5: HIERARCHISATION DES FORMATIONS ARGILEUS	ES
ET ETABLISSEMENT DE LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE	
5.1 Hiérarchisation des formations argileuses et marneuses quant à leur susceptibi	ilitá
supposée vis-à-vis des phénomènes de retrait- gonflement	nie
5.1.1 Critère Lithologie	
5.1.1 Critère Lithologie	
5.1.1 Critère Lithologie	

5.3 Conclusion	
CHAPITRE 6 : CONCLUSION GENERALE	100
BIBLIOGRAPHIE	104
ANNEXE	109
ANNEXE A1	110
ANNEXE A2	119
ANNEXE A3	155

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

- Figure 1 : Carte de découpage administratif (Est Algérien) ;
- Figure 2 : Limites administratifs de la Wilaya de Mila, « vue sous Google Earth » ;
- Figure 3 : Situation Géographique de la zone d'étude « image satellite » ;
- Figure 4 : Situation de la zone d'étude par rapport au découpage des cartes au 1.50000ème.

Chapitre 2

- Figure 5 : Carte et coupe structurale schématique de la chaîne maghrébide montrant la disposition des zones internes et externes (M. Durand Delga et Fontboté ; 1980) ;
- Figure 6 : Carte schématique illustrant la répartition des différents domaines paléogéographiques (avec détail le domaine externe) (J.C. Lahondère, 1977) ;
- Figure 7 : Carte géologique de la disposition de la formation post-nappe du bassin de Mila (J.M. Villa, 1980) ;
- Figure 8 : Coupe géologique schématique illustrant les relations structurales entre les différentes unités de la chaîne alpine d'Algérie nord orientale (M. Durand Delga, 1969) ;
- Figure 9 : Principaux affleurements des séries néritiques Constantinoises (d'après J.M. Vila, 1980) ;
- Figure 10 : Colonne stratigraphique des dépôts néogènes du bassin de Mila (P.E. Coiffait, 1992) :
- Figure 11 : Carte des formations géologiques a l'intérieur des limites de la wilaya de Mila ;
- Figure 12 : Carte de distribution des formations argileux-marneuse dans la Wilaya de Mila ;
- Figure 13 : Carte d'élévation des différentes zones à l'intérieur de la Wilaya de Mila ;
- Figure 14 : Carte d'aspect et exposition de l'argile au soleil.

Chapitre 3

- Figure 15 : Situation du Bassin Versant du Kébir Rhumel ;
- Figure 16 : Carte des pentes de la Wilaya de Mila;
- Figure 17 : Carte de réseau hydrographique à l'intérieur des limites administratives de la Wilaya de Mila ;
- Figure 18 : Carte de densité de drainage de la Wilaya de Mila ;
- Figure 19: Graphe ombro-thermique correspondant à la station Hamala Grarem;
- Figure 20: Graphe ombro-thermique correspondant à la station Beni Haroun;
- Figure 21 : Précipitation moyenne mensuelle en mm (station de Hammam Grouz ;
- Figure 22 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (D'après Côte M., 1998 in Mebarki A., 2005) ;
- Figure 23 : Carte d'indice de Végétation (NDVI).

Chapitre 4

- Figure 24 : Étapes de formation des Endoclastes ;
- Figure 25 : Étapes de formation des Exoclastes ;
- Figure 26: photographie de l'échantillon (code 9) sous microscope polarisant
- Figure 27: photographie de l'échantillon (code 8) sous microscope polarisant
- Figure 28: photographie de l'échantillon (code 10) sous microscope polarisant
- Figure 29: photographie de l'échantillon (code 12) sous microscope polarisant
- Figure 30: photographie de l'échantillon (code 6) sous microscope polarisant
- Figure 31: photographie de l'échantillon (code 7) sous microscope polarisant
- Figure 32: photographie de l'échantillon (code 2) Profondeur [7.50 8.0m] sous microscope polarisant

Figure 33: photographie de l'échantillon (code 2) Profondeur [10.00 – 10.50m] sous microscope polarisant

Figure 34: photographie de l'échantillon (code 4) sous microscope polarisant

Figure 35: photographie de l'échantillon (code 5) sous microscope polarisant

Figure 36: photographie de l'échantillon (code 1) sous microscope polarisant

Figure 37: photographie de l'échantillon (code 9) sous MEB

Figure 38: photographie de l'échantillon (code 8) sous MEB

Figure 39: Diffractomètre Bruker D8 Advance « Université de Liège »

Figure 40: Disque de plexiglas et accessoires

Figure 42: Préparation d'un agrégat orienté

Figure 41: Tamis métallique « ULG »

Figure 43: Vérification du pH de la solution

Figure 44: Centrifugeuse de l'ULG

Figure 45: Présence de sulfates

Figure 46: Analyse de l'échantillon total

Figure 47: Échantillon 5 : Argile Sombre

Figure 48: Échantillon 6 : Argile bariolée

Figure 49: Échantillon 2 : Argile marneuse Sondage, RN79 Mila

Figure 50: Minéraux de la fraction argileuse

Fig. 51: Carte de délimitation des formations argileuses et marneuse et emplacement des sites de prélèvements

Fig. 52: Sondages réalisés par DTP/MILA

Chapitre 5

Fig. 53 Carte de susceptibilité au retrait-gonflement et classification des différentes zones ;

Fig. 54 Carte de susceptibilité confrontée au réseau hydrographique.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau 1 : Répartition en pourcentage des différentes formations lithologiques dans la Wilaya de Mila ;

Chapitre 3

- Tableau 2 : Caractéristiques morphométriques de l'ensemble du bassin Kébir Rhumel ;
- Tableau 3: Statistiques relatives au facteur pente;
- Tableau 4 : Densités de drainage ;
- Tableau 5 : Statistiques relatives à la carte de la densité de drainage ;
- Tableau 6: Précipitations moyennes mensuelles de la période (1984-1997) ; (Station Grarem) ;
- Tableau 7 : Températures moyennes mensuelles de la période : 1984 1997 ;
- Tableau 8 : Répartition saisonnière des précipitations ;
- Tableau 9 : Statistiques relatives à l'indice de végétation normalisé ;

Chapitre 4

- Tableau 10: Résultats d'analyse physico-mécanique et chimique des carottes; SC N° 5 Mila;
- Tableau 11 : Résultats d'analyse des paramètres physiques du site CW 52 ; MILA ;
- Tableau 12 : Résultats d'analyse des paramètres mécaniques du site CW 52 ; MILA ;
- Tableau 13 : Résultats d'analyse par rayons X de l'argile totale SC 1 du site CW 52 ;
- Tableau 14 : Composition granulométrique de l'argile totale du Ferdjioua ;

Chapitre 5

- Tableau 15 : Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère lithologique ;
- Tableau 16 : Notes lithologiques » attribuées aux formations argileuses et marneuses ;
- Tableau 17 : Dépouillement des proportions minéralogiques dans l'échantillon brut ;
- Tableau 18 : Analyse de l'argile totale aux rayons X d'une argile marneuse ;
- Tableau 19 : Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère minéralogique ;
- Tableau 20 : Notes minéralogiques » attribuées aux formations argileuses et marneuses ;
- Tableau 21 : Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère géotechnique ;
- Tableau 22 : Notes géotechniques » attribuées aux formations argileuses et marneuses ;
- Tableau 23 : Classes de susceptibilité des formations argileuses et marneuses ;
- Tableau 24 : Evaluation du degré de susceptibilité des formations argileuses et marneuses.

INTRODUCTION GENERALE

Le gonflement des sols naturels est spécifique à certains sols argileux. Il est principalement lié aux variations de la teneur en eau.

A teneur en eau constante, il n'y a pas, ou peu, de variation de volume. Au contraire, indépendamment des variations des contraintes extérieures:

- lorsque la teneur en eau augmente, on observe un phénomène de gonflement;
- lorsque la teneur en eau diminue, on observe un phénomène de retrait- tassement.

L'ensemble des zones géographiques où existent d'importantes variations et déficits saisonniers d'humidité présente donc des phénomènes de gonflement et de retrait de certains sols argileux, indépendamment des actions perturbatrices de l'homme, de la construction ou de la végétation sur le sol.

Toutefois, le gonflement, sera de nature et d'ampleur différente suivant qu'il s'agira d'une argile ou d'une autre, ou d'une même argile dans un état initial ou un autre. Les solutions constructives pour y remédier ou s'y adapter seront différentes dans un cas ou dans l'autre et la minéralogie de ces argiles joue donc un rôle primordial, qui peut donner des indications fondamentales, dans le processus de recherche d'un mode de fondation.

Tout le nord de l'Algérie est dans une situation "climato – géotechnique" très défavorable, pour au moins les raisons suivantes :

- les déficits saisonniers y sont la règle et atteignent des ampleurs maximales. En conséquence, la teneur en eau des sols varie dans des proportions considérables et le gonflement résultant en surface est donc maximum;
- les argiles minéralogiquement sensibles à ces phénomènes, y sont très répandues, car souvent ce sont ces variations climatiques extrêmes qui sont à l'origine de la formation des minéraux argileux qui constituent les argiles gonflantes.

Le phénomène de gonflement et retrait remet en question la pérennité des constructions et de la voirie.

Afin de réduire le coût exorbitant de ces sinistres pour la collectivité, on se propose de développer des actions de prévention. Il s'agit d'informer les constructeurs de l'existence de sols sensibles au phénomène retrait- gonflement et de réglementer la construction dans ces zones, au moyen de Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles. Le respect de règles de construction relativement simples à mettre en œuvre et peu coûteuses permet, en effet, de s'affranchir de la plupart des désordres.

Le travail de recherche va s'articuler de la manière suivante :

- Cartographie des zones sensibles au phénomène retrait gonflement
- Indentification minéralogique des argiles, présents dans ces sols et déterminer leur proportion.

PLAN DE TRAVAIL

Cette recherche est menée sur le Bassin de Mila, zone réputée potentiellement gonflante, où la présence de ces argiles est reconnue et même parfois, exploitée (témoins le nombre de briqueteries et l'usine de céramique d'Ibn Ziad).

Dans le cadre de cette thèse, nous avons abordé les thèmes suivants:

1. Dans un premier temps nous avons identifié et cartographié les zones sensibles au phénomène de retrait – gonflement : La carte géologique au 1/50 000 de la région

considérée constitue la donnée de base. Notre travail de recherche consiste à affiner les contours des sols argileux sur la base de critères lithologiques, prenant en compte également l'épaisseur et la continuité des termes argileux au sein des formations.

Le diagnostic physico-géographique de la région nous a permis de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans l'alimentation en eau et dans l'écoulement :

- Facteurs orohydrographiques
- Facteurs morphologiques,
- Facteurs climatiques
- Facteurs biogéographiques.

Leur interaction est déterminante dans le comportement géotechnique des sols du bassin au niveau global et régional.

2. Ensuite nous avons procédé à l'étude minéralogique et chimique de ces argiles : Rappelons que les phénomènes de retrait - gonflement s'expriment préférentiellement dans les minéraux argileux appartenant au groupe des smectites et dans une moindre mesure au groupe de la vermiculite et des minéraux interstratifiés comme le chlorite gonflant de type C - V (chlorite vermiculite) ou V- Cg (vermiculite chlorite gonflante).

Les échantillons prélevés sur sites ont été soumis à différentes observations microscopiques réalisées l'Université de Liège en Belgique, (Laboratoire de Géologie et Paléoclimat) et en Tunisie à l'ENIT, (Unité de Recherche Ingénierie et Géotechnique)

3. Étude des caractéristiques mécaniques de ces matériaux :

Pour préciser les caractéristiques mécaniques de ces argiles, nous avons réalisé des essais géotechniques de laboratoire au niveau du LTPE antenne de Tébessa. Les données recueillies, dans la bibliographie et auprès des laboratoires de géotechnique qui travaillent dans le secteur de cette étude sont également analysées et confrontées avec nos propres résultats d'étude.

Parmi les paramètres qui contrôlent le gonflement :

- Les limites d'Atterberg : Spécifiquement pour les sols argileux, on définit trois teneurs en eau conventionnelles qui définissent une transition de comportement; l'ordre de grandeur de chacune d'elle s'avère caractéristique de telle ou telle famille d'argiles.
- L'essai de compressibilité qui permet de définir :
 - o Le coefficient de gonflement (C_g):
 - o Le coefficient de compressibilité (C_c)
 - o La contrainte de préconsolidation (σ'_c)

4. Hiérarchisation des formations argileuses et marneuses quant à leur susceptibilité supposée vis-à-vis des phénomènes de retrait- gonflement.

Nous avons adopté une démarche méthodologique éditée en France par le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM). Il s'agit d'une approche qualitative de la susceptibilité basée sur une hiérarchisation des formations argileuses, préalablement identifiées à partir de la carte géologique, et prenant en compte les trois caractéristiques quantifiables (notées de 1 à 4) suivantes :

- Caractérisation lithologique de chaque formation,
- Caractérisation minéralogique de la phase argileuse par formation,
- Caractérisation géotechnique de chaque formation.

L'indice de susceptibilité constitue la moyenne des notes retenues pour chaque formation argileuse. La carte de susceptibilité est établie sur la base de cet indice avec trois classes : faible, moyenne, forte.

SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

La Wilaya de Mila est limitée au Nord par la Wilaya de Jijel, de l'Ouest par la Wilaya de Sétif, à l'Est par la Wilaya de Constantine et Oum Bouaghi et du Sud par la Wilaya de Batna (Fig. 1).

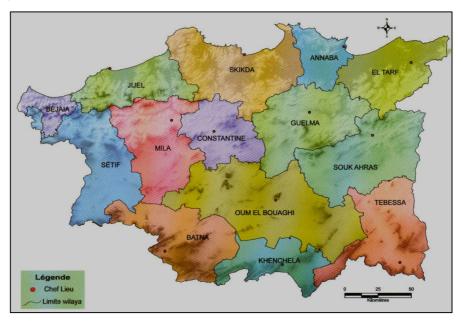


Fig. 1 : Carte de découpage administratif (Est Algérien)

La wilaya de Mila s'étend sur une surface de 3550 km², répartie sur 32 communes et 05 daïras: Ferdjioua, Chelghoum Laid, Grarem Gouga, Oued Naja, Rouached. (Fig. 2 et Fig.3).

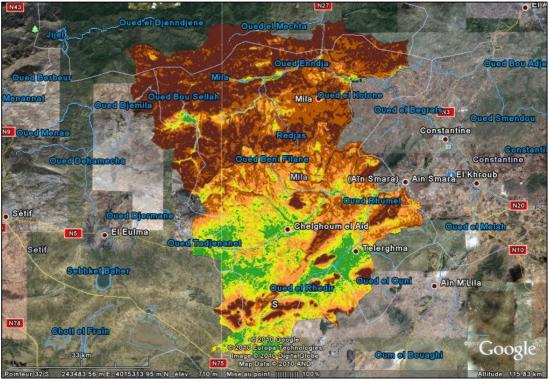


Fig. 2: Limites administratifs de la Wilaya de Mila, « vue sous Google Earth »

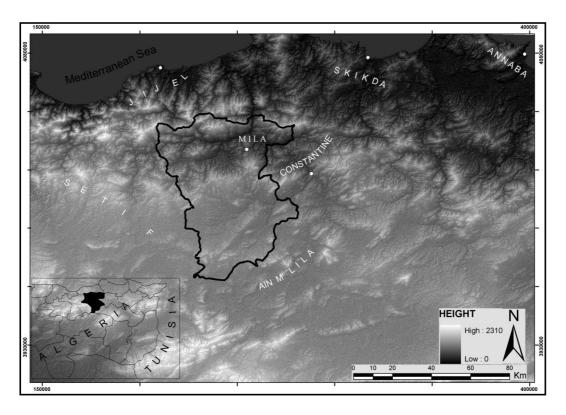


Fig. 3 : Situation Géographique de la zone d'étude « image satellite »

Le bassin de Mila se situe au NE de l'Algérie, à cinquante kilomètres à l'Ouest de Constantine.

La cartographie des formations argileuses et marneuses de la wilaya de Mila a été réalisée à partir des cartes géologiques. Cette cartographie a été réalisée à différentes échelles à partir du 1/200 000 au 1/50 000, qui correspond donc à l'échelle régionale et locale.

La synthèse cartographique a consisté à harmoniser les contours des deux cartes géologiques concernées d'une part (Constantine et Sétif pour l'échelle 1/200 000), et d'autre part (Constantine et Redjas pour l'échelle 1/50 000), c'est à dire à assurer les raccords des limites d'affleurements géologiques au niveau des bordures de feuilles (N-O_3-4 et P-Q_3-4 et 72; 73) (Fig.4), selon le tableau d'assemblage des feuilles au 1/200 000 et au 1/50 000 publiées en 1977 par le service de la carte géologique de l'Algérie; cette harmonisation des contours a pour objectif d'homogénéiser les regroupements lithostratigraphiques entre les cartes.

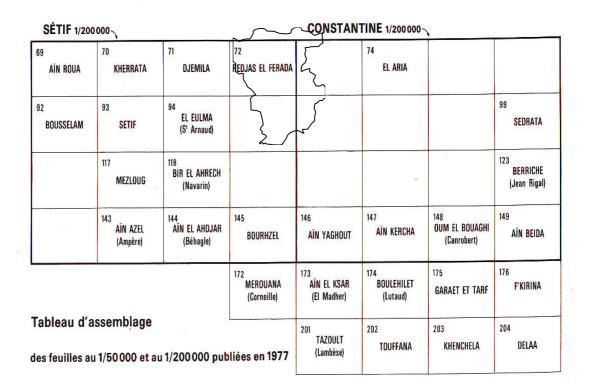


Fig. 4 : Situation de la zone d'étude par rapport au découpage des cartes au $1.50\ 000^{\rm ème}$

GEOLOGIE DU BASSIN DE MILA

2.1 Cadre géologique générale :

Le bassin de Mila appartient au domaine externe de la chaine Alpine d'Algérie Nord Orientale. Cette branche de la chaine Alpine est rattachée à la branche Sud des maghrébides entre le détroit de Gibraltar à l'Ouest et la Sicile et la Calabre à l'Est. (Fig. 5).

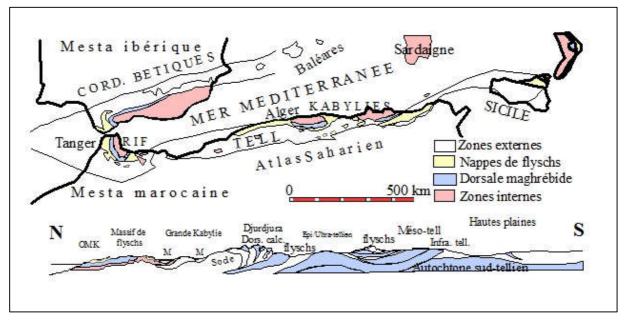


Fig. 5 : Carte et coupe structurale schématique de la chaîne maghrébide montrant la disposition des zones internes et externes (M. Durand Delga et Fontboté ; 1980)

La partie Nord Orientale de cette branche est généralement subdivisé en deux grands domaines (Wildi, 1983 ; Durand Delga, 1969 ; Bouillin, 1977), qui sont :

- Un domaine interne, regroupant le socle kabyle et les formations des flyschs.
- Un domaine externe, correspondant aux formations telliennes et de l'avant pays.

2.1.1 LE DOMAINE INTERNE

Le Domaine interne Correspond au socle cristallophyllien et sa couverture sédimentaire carbonatée (dorsale kabyle); Le socle est constitué de formations cristallophylliennes d'âge Paléozoïque (Durand Delga, 1969; Raoult, 1974); subdivisé en deux grands ensembles:

- Un ensemble Gneissique, à intercalation de marbre, ayant cristallisé dans les conditions du faciès granulites (Kornprost et al, 1977).
- Un complexe Phylladique au sommet qui montre de bas en haut :
- a) Schistes noirâtres, montrant à leur base un conglomérat dissocié remaniant les phyllades sous-jacents.
- b) Psammites rouges et vertes à Graptolite.
- c) Grès calcaires à Tentaculites.
- d) Calcaires à Orthocères.

Cet ensemble supérieur est surmonté en discordance par des formations Siluriennes (Durand Delga, 1969). Par endroits, le socle kabyle forme un ensemble charrié sur les terrains Mézozoiques et tertiaires (Bouillin, 1977).

A. Les formations de l'Oligo-Miocène kabyle et les Olistostromes :

- 1. **L'Oligo-Miocène Kabyle** (O.M.K): qui constitue la couverture sédimentaire transgressive du socle kabyle (Raoult, 1975). Il s'agit de formations détritiques comportant trois termes :
- Conglomérat à la base, reposant en discordance sur les formations du socle kabyle.
- Grès micacés à débris provenant du socle kabyle associés à des pélites micacés.
- Pélites et Silexites à radiolaires et diatomées.
- 2. Les Olistotromes : qui sont des formations tectono-sédimentaires à débris de flysch intercalées avec des passées gréso-micacées. Ces formations d'âge probable Aquitanien-Burdigalien inférieur (Bouillin, 1977), reposant sur les formations de l'Oligo-Miocène Kabyle.
- B. **Dorsale kabyle**: Elle forme la couverture méridionale du socle kabyle, cette chaîne calcaire marque la limite entre le socle kabyle au Nord et les Zones telliennes au Sud. L'âge de ces formations carbonatées s'étale du Permo-Trias à l'Oligocène (Raoult, 1974). Raoult prétend que la dorsale kabyle est subdivisée en unités qui sont du Nord au Sud:
- Dorsale interne : comportant des séries allant de Permo-Trias au Néocomien, représentées par des calcaires néritiques massifs riches en microfaune benthique qui atteignent le sommet du Lutétien.
- Dorsale externe : constituée essentiellement de calcaire dolomitique du Jurassique inférieur et par un Crétacé supérieur et Eocène inférieur détritique.
- C. Formations de types flyschs : se sont des formations sédimentaires allochtones d'âge Crétacé à Eocène et qui sont subdivisées en :
- a) Le Flysch Maurétanien: qui sont épaisses et datées du Néocomien jusqu'au Lutétien. Au Néocomien, elles sont pélito-calcaro-gréseuses à pélito-gréseuses. Le sommet de ces formations se termine par des *Turbidites* calcareuses. (Gelard, 1969). Dans le Nord Constantinois, le flysch de type Maurétanien d'âge Lutétien comporte un substratum Triasico-Jurassique, riche en calcaire à radiolarites, des microbrèches à ciment spathique riche en quartz détritique et parfois des microconglomérats du Sénonien et se termine par une couverture gréso-micacée d'âge Priabonien-Oligocène, (Bouillin, 1977).
- b) Le flysch Massylien : les formations du flysch massylien sont essentiellement pélitoquartziques, (Raoult, 1969-1972). Ces flyschs comportent une série qui va du Crétacé

inférieur à l'Eocène, montrant au Cénomanien des niveaux de phtanites et des bancs calcaires à microfaune pélagique du Turonien-Cénomanien. Par-dessus ces formations s'observe un Companien supérieur argileux, à blocs variés et à intercalations gréseuses. Enfin, le Companien supérieur et le Maestrichtien correspondent à un flysch à microbrèches calcaires en lits centimétriques à décimétriques, (Bouillin, 1977).

c) Le flysch Numidien: il forme une entité à part. il occupe une position structurale allochtone, la plus haute de l'édifice alpin. Il est représenté par une série argilo-gréseuse d'âge Oligocène à Burdigalien basal (Bouillin, Raoult, 1971 et Lahondère, 1979). Il est caractérisé à la base par des argiles sous numidiennes à *Tubotomaculum* surmontées par des grès numidiens à grain de quartz hétérométrique et le sommet se termine par des marnes à silexites qui correspondent aux formations supra-numidiennes.

2.1.2 DOMAINE EXTERNE:

Il correspond aux formations telliennes situées sur la paléomarge Africaine (Bouillin, 1986). Ce sont des séries épaisses à faciès marno-calcaire d'âge Eocène, issues du sillon tellien (Vila, 1980). Certains auteurs notamment Durand Delga a subdivisé les formations du domaine tellien en trois grandes unités : (Fig. 6)

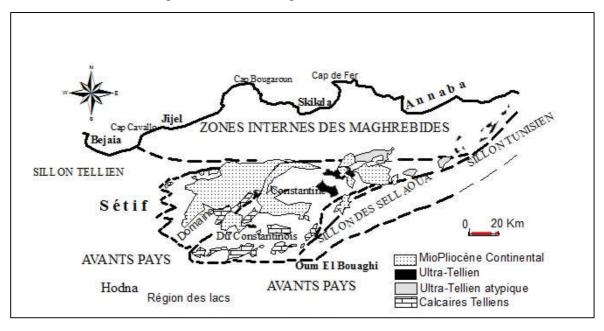


Fig. 6 : Carte schématique illustrant la répartition des différents domaines paléogéographiques (avec détail le domaine externe) (J.C. Lahondère, 1977)

2.1.2.1 Les unités ultratelliennes :

Les unités ultratelliennes sont largement développées dans le Constantinois. Ces unités déposées sur sa marge septentrionale, sont caractérisées par des faciès micritiques clairs d'âge Crétacé à Eocène (Durand Delga, 1969).

Il s'agit de séries épaisses à dominante marneuse et marno-calcaire, d'âge allant du Néocomien au Lutétien avec une composante détritique au Sénonien. L'Yprésien est calcaire et l'éocène comporte trois termes:

- Marnes sombres à boules jaunes d'âge Dano-Paléogène ;
- Calcaire à silex noir et cassure grise, d'âge Lutétien inférieur ;
- Marnes sombres d'âge Lutétien supérieur.

2.1.2.2 Les unités telliennes senso-stricto :

Elles regroupent les unités épi, méso et infra telliennes (Keiken, 1962).

Ces unités correspondent aux formations carbonatées du Jurassique, souvent dolomitisées et surmonté de calcaire plus ou moins massif, du Valanginien au Cénomanien. Le Cénomanien supérieur correspond le plus souvent à un arrêt de sédimentation marqué par une surface durcie. Le Crétacé supérieur caractérisé par la formation pélagique, l'Eocène par une couverture marneuse noire et l'Yprésien, par des carbonaté à silex. Quand à l'Oligocène, il affleure très peu, il s'agit de marnes contenant une passée gréseuse (Coiffait, 1992).

2.1.2.3 Les unités pénitelliennes :

Elles sont représentées au Nord et à l'Ouest de Constantine (Djebel Chettaba, Djebel Akhal, Djebel Grouz et Djebel Kheneg). Dans la zone septentrionale et occidentale, cette unité se distingue par ses formations Jurassico-Crétacées caractérisées par des faciès intermédiaires entre les faciès de plate forme (calcaire et marno-calcaire du néritique) et des faciès de bassins (marnes du domaine tellien).

Les formations pénitelliennes s'étalent sur une étendue de 150 km de l'Est à l'Oeust et de 40 km du Nord au Sud (Vila, 1980).

Selon S. Guellel et al (1977), le Crétacé inférieur présente une épaisse série continue à influence marneuse avec de rares intercalations gréseuses fines, ainsi que des niveaux de pélites discordants et des niveaux conglomératiques intraformationels qui se poursuivent jusqu'à l'albien inférieur.

Le Crétacé supérieur montre une série composée d'alternance de marnes à *rotalipores* et de calcaire biomicritique du Cénomanien, à intercalations de niveaux de silex. Le Sénonien est représenté par un faciès marneux et marno-calcaire avec des niveaux conglomératiques ou biodétritiques. Les séries pénitelliennes, ne dépassent pas le Maestrichtien moyen.

2.1.2.4 Domaine de l'avant pays :

Il correspond aux formations calcaires et marneuses de la plate forme constantinoise et du domaine atlasique. Il comporte l'avant pays allochtones et l'avant pays autochtones (J. M. Vila, 1980).

2.1.2.4.1 L'Avant pays allochtones:

D'Ouest à l'Est, l'avant pays allochtones comporte plusieurs unités :

• Les unités Sud-Sétifiennes : ces unités ont été décrites par J. M. Vila (1980), elles sont caractérisées par des séries Mésozoïques de plate forme subsidante, qui admettent des

intercalations pélagiques. Elles s'intercalent entre l'unité néritique constantinoise et les écailles atlasiques des Sellaoua (Wildi, 1983).

- Les unités néritiques constantinoises : ces unités sont caractérisées par des séries carbonatées épaisses à microfaune benthique et à rudistes du Mésozoïque (Vila, 1980), déposées sur une plate forme faiblement subsidante. Ces unités chevauchent les écailles de Sellaoua et les unités Sud Sétifiennes. Les unités du domaine néritique Constantinois sont représentées essentiellement par des calcaires Jurassico-Crétacé, dont les épaisseurs peuvent atteindre les 2000m. Ces séries se caractérisent par une grande homogénéité de faciès avec un substratum carbonaté et une couverture marneuse ou marno-calcaire d'âge Crétacé supérieur à Eocène.
- Les unités des Sellaoua: Elles affleurent au pied des séries néritiques constantinoises chevauchantes. Le saut brusque de faciès entre ces séries et l'atlas autochtone serait cependant suffisant pour envisager des raccourcissements considérables attribuables à des chevauchements de grande ampleur (Vila, 1980).

La série stratigraphique de la région des sebkhas des Sellaoua, moins calcaires à faciès plus profonds, montre une épaisse série d'argile, de marnes parfois finement sableuses et de grès fins qui débute au Valanginien et se poursuit par une couverture tertiaire peu épaisse du paléocène au Lutétien supérieur et localement jusqu'à l'Oligocène. Quant à l'Yprésien, il est carbonaté et riche en nummulites (P. E. Coiffait, 1992).

2.1.2.4.2 L'Avant pays autochtones :

Il est représenté par des séries sédimentaires Mésozoïques épaisses et très plissées. Ces séries sont principalement localisées au niveau de l'atlas Saharien, Monts du Hodna, Monts de Batna et Monts des Aurès.

2.1.2.5 Les formations post-nappes : (Fig. 7)

L'âge Burdigalien établi pour la mise en place des nappes dans le Constantinois, permet de considérer que les formations post-nappes regroupent l'ensemble des dépôts postérieurs au Burdigalien. Il s'agit de formations continentales et marines transgressives et discordantes sur les formations et les structures anté-Burdigaliennes.

La répartition actuelle des affleurements post-Burdigalien permet de distinguer deux grands ensembles (Delga, 1955; Bouillin, 1977, Vila, 1980 et Coiffait, 1992):

1. Un ensemble Nord représenté par les bassins côtiers dont le bassin de Mila et le bassin de Guelma, représentants les bassins les plus méridionaux.

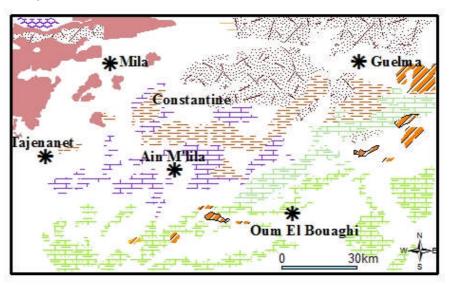
Dans ces bassins côtiers, les formations post-nappes sont différenciées en faciès au Nord et au Sud de l'accident Est-Ouest (l'accident de M'cid Aicha-Debar) qui délimite la bordure méridionale du bloc kabyle. Cette différenciation est caractérisée par des formations marines au Nord et des formations laguno-lacustre au Sud.

2. Un ensemble Sud représenté par des bassins situés au-delà des limites méridionales et orientales actuelles des massifs calcaires de la plate forme constantinoise.

Les bassins situés au Sud de l'accident de M'cid Aicha-Debar, comportent un remplissage composé pour l'essentiel de formations continentales, d'âge Miocène

supérieur à Quaternaire (L. Joleaud, 1912; M. Durand Delga, 1955; J. F. Raoult, 1974; P. E. Coiffait, 1992).

Selon une direction Est-Ouest, le remplissage du bassin de Mila débute localement par des formations marines d'âge Burdigalien Terminal-Langhien et qui passent vers le haut à des formations continentales Miocènes et Plio-Quaternaires (L. Joleaud, 1912; M. Delga, 1955 et P. Coiffait, 1992).



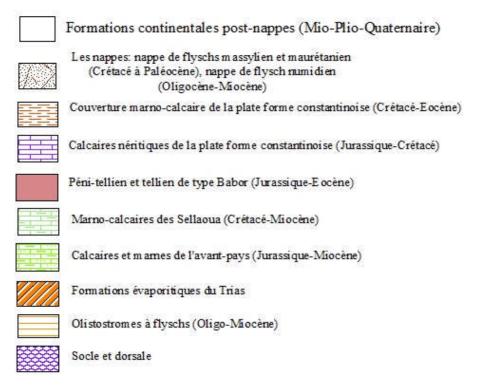


Fig. 7 : Carte géologique de la disposition de la formation post-nappe du bassin de Mila (J.M. Villa, 1980)

2.1.2.6 LES PHASES TECTONIQUES : (Fig. 8)

Si la période prétectogénique a commencé dès le Trias, la chaine alpine d'Algérie s'est surtout structurée au cours des phases tectoniques tertiaires. Cette structuration est rattachée à la fermeture du sillon de flysch dont le continu a été expulsé et largement charrié au dessus des zones externes (N. Kazi Tani, 1986).

2.1.2.6.1 Les phases tectoniques mésozoïques :

Dans les zones externes de la chaine alpine d'Algérie orientale, les évènements tectoniques mésozoïques sont peu étudiés.

Au Jurassique inférieur, la distension se poursuit et provoque une subsidence différentielle qui persiste jusqu'à la fin du Crétacé inférieur, avec la structuration générale «Est-Ouest » caractéristique des bassins maghrébins (G. Durozoy, 1960 ; C. Voute, 1967 ; N. Kazi-Tani, 1986).

La tectonique mésozoïque est mise en évidence par des variations de faciès, des lacunes de dépôts et des discordances angulaires.

Deux phases tectoniques localisées au passage Jurassique-Crétacé et au Crétacé supérieur sont souvent citées par les auteurs (M. Durand Delga, 1955; R. Guiroud, 1973; M. Leikine, 1974).

- **2.1.2.6.1** La phase du Jurassique supérieur : cette phase souligne la fin d'une période distensive et subsidente qui caractérisait le Jurassique inférieur et moyen (J. Proust et al, 1977). L'importance de cette phase tectonique est surtout attestée par des discordances angulaires qui marquent la base du Crétacé inférieur (M. Durand Delga, 1955).
- **2.1.2.6.1.2** La phase Anté-Sénonienne : cette phase correspond à une phase de compression associée à des plis E-W (M. Delga, 1955 ; P. Deleau, 1939). Les structures issues de cette phase, sont souvent déversées vers le Sud et sont liées à des discordances, des lacunes et des intercalations détritiques.

2.1.2.6.1.3 Les phases tectoniques Tertiaires :

Dans la plate forme du Constantinois, la période tectonique a été marquée essentiellement par deux phases importantes de mouvements :

2.1.2.6.1.4 La phase Fini Lutétienne :

Une phase assez générale se place vers la fin du Lutétien: c'est la phase atlasique (R. Guirand,) 1973; fini-Lutétienne (M. Durand Delga, 1969; J. F. Raoult, 1974); priabonienne (J. M. Vila, 1980).

Deux grandes directions d'accidents caractérisent cette phase l'une NS et l'autre NW-SE (J. P. Bouillin, 1977) et des plissements de direction NE-SW (J. M. Vila, 1980). Généralement toute la déformation rattachée à cette phase donne des structures à caractère compressive.

Cette phase aurait structuré la chaîne calcaire (ou dorsale kabyle), les flyschs et les séries telliennes en grandes lames ou en plis couchés à convergence Sud, surmontées par les unités internes.

Les travaux de J. P. Bouillin (1971-1978) dans les zones internes de la chaîne alpine d'Algérie apportèrent des observations précises sur la tectonique et la structure des zones internes du Constantinois. En mettant en évidence la superposition d'évènements tectonique dans le temps, il conclu à l'existence d'une tectonique continue de la fin du Lutétien au Burdigalien moyen.

2.1.2.6.1.5 La phase Miocène :

Cette phase Miocène est aussi une phase de compression. Elle est caractérisée dans toute l'Algérie Nord orientale par un raccourcissement de direction N-S, elle aurait débuté au Burdigalien moyen dans les zones septentrionales (J. P. Bouillin, 1977).

Pour J. M. Vila, c'est la phase majeure Tortonienne à vergence Sud qui est responsable des vastes recouvrements anormaux impliquant les formations postérieures au Burdigalien élevées dans la nappe numidienne. A ces recouvrements anormaux sont associés des décrochements NW-SE et NE-SW.

Le résultat de cette tectonique a donné lieu à un dispositif structural assez complexe, caractérisé par la superposition du socle kabyle sur la couverture sédimentaire, formé par les nappes de flysch charriés sur les formations telliennes.

Selon J. M. Vila (1980), cette phase serait responsable de la genèse de la «nappe néritique Constantinoise», des unités allochtones des Sellaoua et de l'ensemble Sud Sétifien ainsi que, des unités méridionales à nummulites.

2.1.2.6.1.6 La Tectonique récente :

Dans le Constantinois, J. M. Vila (1980) et P. E. Coiffait (1992), considèrent que les formations liées à la tectonique récente sont représentées par des failles normales, de directions variables, en bordures des massifs calcaires Jurassico-Crétacé.

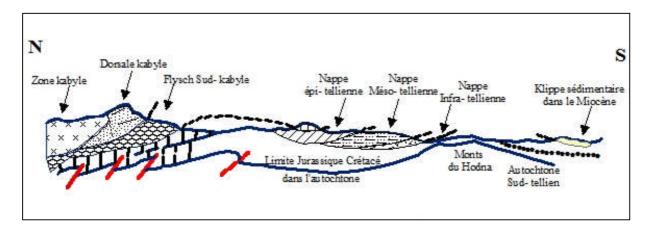


Fig. 8 : Coupe géologique schématique illustrant les relations structurales entre les différentes unités de la chaîne alpine d'Algérie nord orientale (M. Durand Delga, 1969)

2.2 Géologie du bassin de Mila

Le bassin néogène de Mila est limité au Nord par l'arête montagneuse du M'Cid Aicha et du Sidi Driss, au Sud par le Djebel Akhal et Djebel Grouz, à l'Est par le massif du Chettabah et Djebel Kheneg et à l'Ouest par le Djebel Boucherf et Oukissène. (Fig. 9)

L'une des caractéristiques géologiques du bassin de Mila, est la prédominance de dépôts détritiques et évaporitiques du Mio-Pliocène. Les terrains constituant le bassin de Mila du plus anciens au plus récents sont les suivants :

- Le Trias: Ils sont essentiellement représentés par des dépôts évaporitiques et argileux. Ces formations affleurent dans la région de Sidi Merouane, et au pied des massifs du Kheneg, Djebel Akhal et du Djebel Chettabah.
- Le Jurassique: Les formations du Jurassique sont représentées par une épaisse série carbonatée dépassant les 600m au niveau des massifs bordant le bassin de Mila, notamment aux Djebel Kheneg, Djebel Akhal, Djebel Kerkara et au Djebel M'Cid Aicha (Durand Delga, 1956; Raoult, 1974).

Elles sont caractérisées par dolomies et des calcaires à silex. Ces formations sont localement associées à des calcaires massifs oolithiques et parfois des marnes.

- Le Crétacé: il est caractérisé à la base par des marnes et des marno-calcaires. Ces formations sont bien connues au Djebel Akhal, ainsi qu'à l'Ouest dans le massif d'Ahmed Rachedi, du Djebel Oukissène, du Djebel Boucherf et du Djebel Halfa et dans la région de Sidi Merouane. Ensuite au Cénomanien, des horizons marno-calcaires de couleur grise et des marnes gris bleutées, parfois gypsifères et des barres de calcaires massifs. Le Cénomanien est marqué dans sa partie inférieure par une surface durcie.

Ces massifs sont connus dans les massifs du Djebel Kheneg, Djebel Grouz, Djebel Zouaoui et Djebel Chettabah.

- Le Paléocène et l'Eocène : Au Nord de Redjas El Ferrada, la série type du Paléocène et de l'éocène, est formée par des marnes noires à débit finement feuilleté.
- Le Mio-Pliocène: Les formations du Mio-Pliocène recouvrent la majeure partie du bassin de Mila. Elles sont représentées essentiellement par des dépôts détritiques (conglomérats, graviers, sable et argiles) et des dépôts évaporitiques (gypse, anhydrite et sel gemme) et des calcaires lacustres.

- Le Quaternaire:

Les formations quaternaires sont largement représentées dans le bassin de Mila au niveau des vallées : Oued Rhumel, Oued Endja.

Il s'agit de graviers et des blocs roulés recouverts d'une croûte calcaire feuilletés, dans une matrice limoneuse.

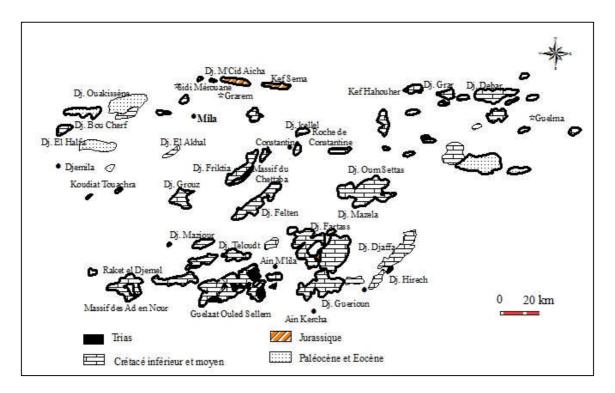


Fig. 9 : Principaux affleurements des séries néritiques Constantinoises (d'après J.M. Vila, 1980)

2.3 Caractéristiques lithologiques des dépôts néogènes du bassin de Mila

2.3.1 Introduction:

Le bassin de Mila, connu souvent sous le nom du bassin de Mila-Constantine, est une vaste dépression de quelques quarantaines de kilomètres de largeur et de 120km de longueur, correspond à un remplissage d'une dépression par des dépôts néogènes. Ces dépôts néogènes forment la couverture d'un substratum formé par un empilement de nappes de flysch et de séries telliennes généralement allochtones. Le substratum tellien de ce bassin peut parfois affleurer à la faveur de l'érosion. Les caractéristiques lithologiques de ces dépôts néogènes sont le résultat d'une synthèse à partir des travaux géologiques récents de Coiffait (1992) et des observations de terrain recueillies au niveau de différents sites (Fig. 10).

2.3.2 Description lithostratigraphique:

Les dépôts néogènes du bassin de Mila comportent les termes suivants :

Terme I: A la base, les argiles grises gypsifères de l'Oued Mila reposent sur un substratum tellien, soit directement, soit par un ensemble détritique à dominante argileuse. Cet ensemble détritique contient des galets de teinte généralement rouge vif moins souvent brune. Il apparaît localement en boutonnière au niveau de l'Oued Metlili.

Ces argiles de base, affleurent largement autour de la ville de Mila, leur partie sommitale est à tendance nettement marine comme en témoignent les argiles à *Ostreacrassissima* rencontrées au Sud-Est de Mila (P. E. Coiffait, 1992).

L'argile de base est surmontée par des conglomérats massifs de teinte généralement brune à beige à nombreux galets de marnes telliennes qui d'intercalent dans les argiles de même faciès rencontrées au Sud.

Terme II : Ce terme est constitué par un niveau de conglomérat à blocs peu roulés, noyés dans une matrice argilo-sableuse et des passées gréseuses à ciment calcareux.

Les galets, dont la taille varie de 1 à 30cm, sont empruntés essentiellement au numidien, à l'Yprésien tellien (calcaire et silex) et au flysch massylien (microbrèches). La nature de ces éléments détritiques indique une alimentation méridionale ou orientale non septentrionale (M. Durand Delga, 1955).

La teinte de ces formations conglomératiques est plus rougeâtre au sommet qu'à leur base. Ces conglomérats sont très développés le long de l'Oued Mila (route Mila-Jijel). Ces conglomérats reposent d'ailleurs directement sur les marnes éocènes, ce qui témoigne de leur caractère transgressif.

Terme III: Ce terme correspond à des marnes qui sont le plus souvent grises à noires, mais elles peuvent aussi avoir des teintes rougeâtres à violacé.

Ces niveaux marneux contiennent des passées gypseuses qui annoncent le régime franchement lagunaire, qui va se poursuivre par le dépôt de marnes jaunâtres très sableuses à alternances d'argile noire, de grès fins jaunâtres et de calcaire marneux. Les niveaux gypsifères sont en lentilles de faible épaisseur.

Terme IV: C'est un ensemble de plus en plus détritique formé de :

- A la base, de marne gris brunâtres, passant à des marnes brun jaunâtre, sableuses, alternant avec des bancs de grès jaunâtre à matrice argileuse et à stratification entrecroisée. L'épaisseur de ces formations peut atteindre une vingtaine de mètres.
- Au dessus viennent des grès beiges à jaunâtres, avec quelques passées de galets centimétriques en bancs métriques, alternant avec des assises argilo-sableuses.
- Enfin des conglomérats bruns à la base, puis rougeâtres vers le sommet à galets décimétriques noyés dans une matrice gréso-pélitique.

Terme V: Le terme sommital de la série est constitué par une dalle de calcaire travertineux lacustre de 50m à 100m de puissance allant de Ras El Bir jusqu'au village de Sidi Merouane.

Ces calcaires très durs, ont une teinte blanchâtre à rougeâtre, alternant avec des niveaux d'argiles rouges ou orange, plus rarement brunes.

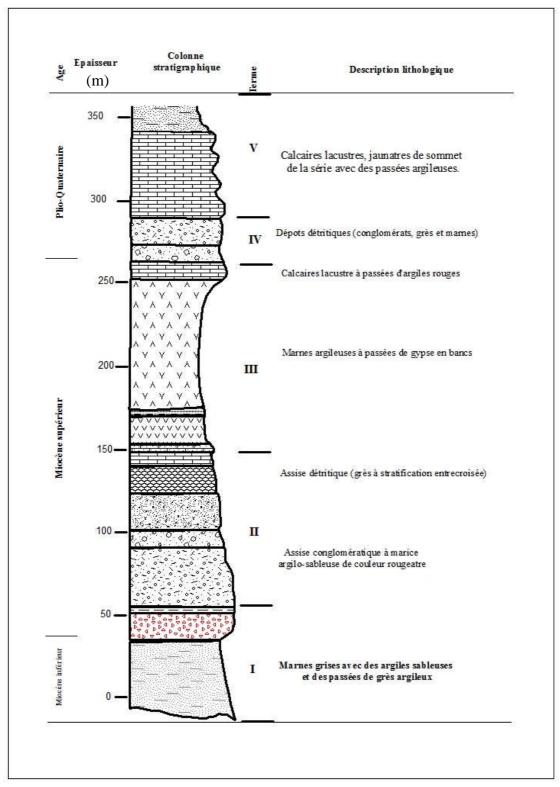


Fig. 10 : Colonne stratigraphique des dépôts néogènes du bassin de Mila (P.E. Coiffait, 1992)

2.3.3 Identification, Délimitation et Cartographie des formations géologiques argileuses et marneuses

L'objectif visé est de disposer d'une carte des formations géologiques argileuses et marneuses de la Wilaya de Mila afin d'avoir des précisions géographiques des zones caractérisées par la susceptibilité au retrait-gonflement.

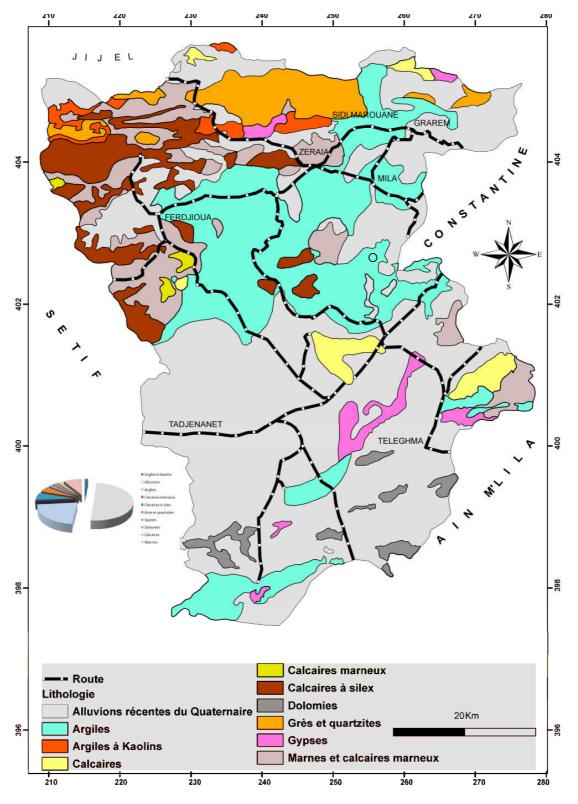
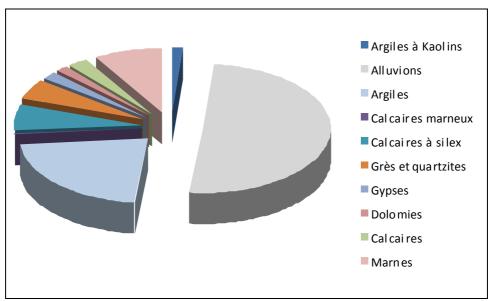


Fig. 11 : Carte lithologique de la wilaya de Mila

Lithologie	Surface (Km²)	%
Argiles à Kaolins	53.49	1.53
Alluvions	1756.48	50.14
Argiles	764.54	21.83
Calcaires marneux	12.99	0.37
Calcaires à silex	226.92	6.48
Grès et quartzites	169.68	4.84
Gypses	73.27	2.09
Dolomies	58.43	1.67
Calcaires	80.77	2.30
Marnes	306.1	8.74
Total:	3502.69	



Tab. 1 : Répartition en pourcentage des différentes formations lithologiques dans la Wilaya de Mila

2.4 Caractéristiques lithologiques des dépôts néogènes du bassin de Mila

La nature lithologique du sol constitue un facteur de prédisposition prédominant dans le mécanisme de retrait-gonflement.

La procédure d'étude de la nature lithologique du sol, basée sur l'exploitation des cartes géologiques disponibles.

Or, concernant la nature des formations géologiques, les éléments qui influent sur la susceptibilité au retrait-gonflement sont en premier lieu la lithologie de la formation (c'est à dire principalement la proportion de matériaux argileux, autrement dit d'éléments fins inférieurs à $2\,\mu$).

En moindre proportion, mais non négligeable, la géométrie de la formation argileuse influe sur la susceptibilité au retrait-gonflement. En effet, une formation sera d'autant plus sujette à ce phénomène qu'elle sera en position superficielle et de géométrie épaisse et continue.

Le bassin de Mila, situé au nord-ouest de Constantine (feuille73), s'étend à l'ouest jusqu'au frontière de la wilaya de Sétif (feuille 72, Redjas Ferada).

Ce bassin qui couvre une superficie de 3500km² est connu souvent sous le nom du bassin de Mila-Constantine, il forme une vaste dépression de quelques quarantaines de kilomètres de largeur et de 120km de longueur, correspond à un remplissage d'une dépression par des dépôts néogènes. Ces dépôts néogènes forment la couverture d'un substratum formé par un empilement de nappes de flysch et de séries telliennes généralement allochtones. Le substratum tellien de ce bassin peut parfois affleurer à la faveur de l'érosion. Les caractéristiques lithologiques de ces dépôts néogènes sont le résultat d'une synthèse à partir des travaux géologiques récents de Coiffait (1992) et des observations de terrain recueillies au niveau de différents sites (Fig. 11).

Les formations, identifiées sur la base de critères lithologiques, vont faire l'objet d'une hiérarchisation quant à leur susceptibilité supposée vis-à-vis des phénomènes de retraitgonflement. Cette classification sera établie sur la base de trois caractéristiques principales quantifiables : la nature lithologique de la formation, la composition minéralogique de la phase argileuse et le comportement géotechnique des terrains.

La cartographie géologique synthétique a été réalisée et numérisée à l'échelle du 1/50.000 (qui correspond à l'échelle de validité de la donnée brute).

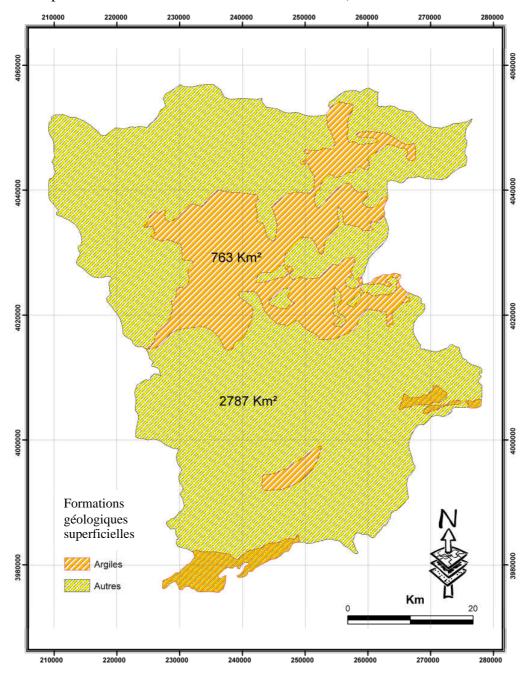


Fig. 12 : Carte de répartition des formations argileux-marneuse dans la Wilaya de Mila

2.5 Contexte géomorphologique

La topographie de surface constitue un facteur permanent de prédisposition et d'environnement qui peut conditionner la répartition spatiale du phénomène de retrait-gonflement. (Fig. 13)

La présence d'une pente favorise le ruissellement et donc le drainage, tandis qu'une morphologie plate sera d'avantage susceptible de recueillir des eaux stagnantes qui ralentiront la dessiccation du sol. Par ailleurs, un terrain en pente exposé au sud sera plus sensible à l'évaporation du fait de l'ensoleillement, qu'un terrain plat ou exposé différemment (Fig. 14). En outre, les formations argileuses et marneuses affleurent sur le flanc des oueds, dans le cas de la ville de Mila, ce qui peut occasionner, localement, un fluage lent du versant et la formation de loupes argileuses. Ce phénomène vient s'additionner aux désordres consécutifs à la seule dessiccation.

D'autre part, il arrive souvent que les constructions sur un terrain en pente soit plus sensible au problème de retrait-gonflement, comme c'est le cas des 185 logements, dont on va détailler l'étude, en raison d'une dissymétrie des fondations lorsque celles-ci sont descendues partout à la même côte. Le bâtiment se trouve alors enterré plus profondément du côté amont. De ce fait, les fondations situées à l'aval subiront des mouvements plus importants de la part du sol qui, étant en position plus superficielle, est souvent plus altéré et donc davantage sensible aux variations de teneur en eau ; c'est d'ailleurs le cas des 185 logements situés à la sortie de Mila, en allant vers Ferdjioua.

Dans le cadre de cette étude, nous avons établie plusieurs cartes par modèles numériques de terrain sous AcrcGis 9.3 qui montrent le relief et l'élévation des différentes zones à l'intérieur de la Wilaya de Mila (Fig. 13), la carte d'aspect nous donne une idée sur l'exposition de l'argile aux rayons solaires, la mojorité des terrains argileux sont d'une orientation Est à Ouest, ce qui explique l'effet du soleil sur la quantité d'eau qui remplie les pores et les interstices des sols. (Fig. 14)

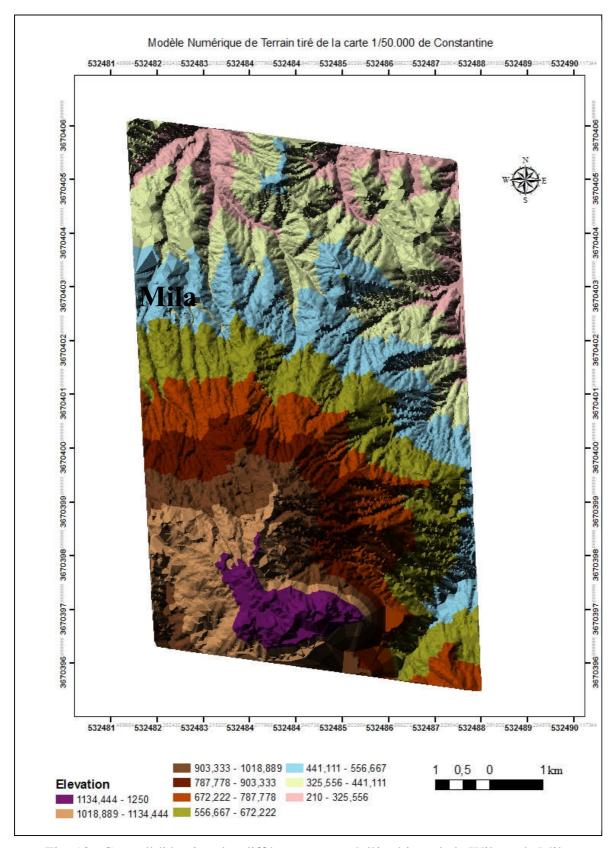


Fig. 13 : Carte d'élévation des différentes zones à l'intérieur de la Wilaya de Mila

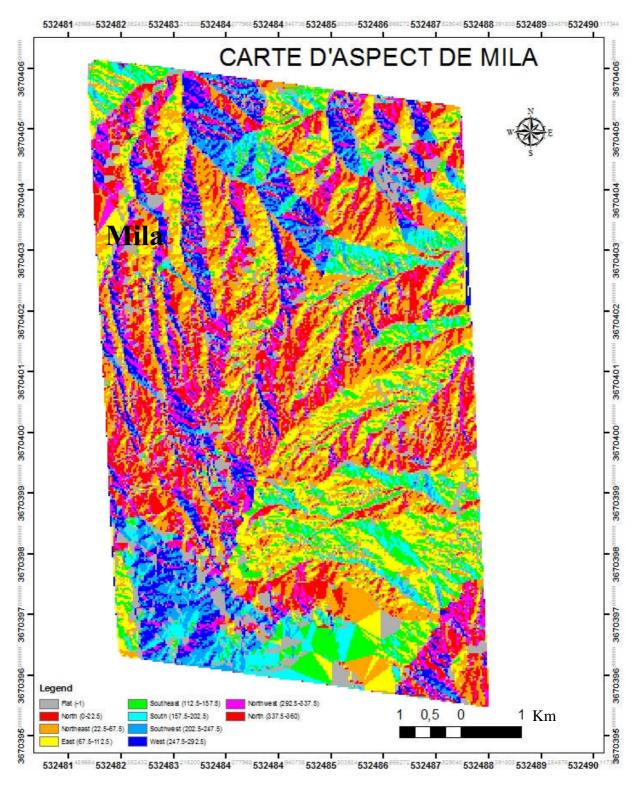


Fig. 14: Carte d'aspect et exposition de terrain au soleil

CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DU BASSIN KEBIR RHUMEL

3.1 Introduction:

Un terrain argileux est fondamentalement instable puisqu'il change de propriétés physiques en fonction de l'humidité, donc des saisons et du climat. Sur un terrain plat et humide, toute surcharge provoque un enfoncement local et un fluage de l'argile.

Le diagnostic physico-géographique de la région d'étude nous conduit à projeter le secteur dans son bassin-versant qui permettra de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans l'alimentation en eau et dans l'écoulement: facteurs orohydrographiques et morphologiques, lithologiques, climatiques et biogéographiques. Leur interaction est déterminante dans le comportement géotechnique des sols du bassin au niveau global et régional.

3.2 Aperçu morpho-structural du bassin « KEBIR RHUMEL » :

Le bassin du Kébir Rhumel, qui s'étale entre la mer méditerranée au Nord et les hautes plaines des Chotts au Sud, présente un relief compartimenté, reflet de la nette opposition topographique Tell-Hautes Plaines qui le caractérise. Il est juxtaposé aux autres unités hydrologiques recouvrant également Tell et Hautes Plaines : le bassin de la Seybousse à l'Est et le bassin de la Soummam à l'Ouest. (Fig. 15).

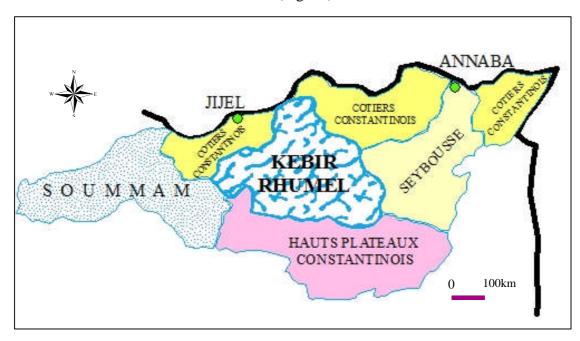


Fig. 15: SITUATION DU BASSIN VERSANT DU KEBIR RHUMEL

De point de vue structural, le bassin du Kébir Rhumel se caractérise par un substratum relativement simple au Sud formé par de vastes étendues sédimentaires d'où émergent des massifs calcaires isolés, et un édifice beaucoup plus complexe au Nord constitué de nombreuses séries hétérogènes empilées au cours de phases tectoniques successives.

Ainsi, On distingue de l'amont à l'aval du bassin : les hautes plaines, le piémont Sudtellien et les massifs telliens du Nord.

3.3 Caractéristiques Morphométriques de l'ensemble du bassin Kebir Rhumel :

Les différents paramètres morphométriques du bassin (forme, altitude, pente, relief, etc....) interviennent, et souvent de façon combinée, dans les modalités de l'écoulement. Le tableau récapitulatif (Tab. 2), donne cette quantification de l'aspect du milieu physique de l'amont à l'aval du bassin Kebir Rhumel.

Bassin	Surface «A» (km²)	Altitude moyenne (m)	Altitude minimale (m)	Altitude maximale (m)	Indice de compacité	Indice de pente	Classe de relief
				` ,		globale « I _g » (m/km)	
Oued Rhumel à O. Athmenia	1130	913	700	1276	1.17	11.3	Relief modéré
Oued Rhumel à Ain Smara	2197	885	604	1377	1.20	10.5	Relief modéré
O. Bou Merzoug à El Khroub	1626	880	575	1729	1.07	27.3	Relief assez fort
Oued Rhumel à Grarem	5293	806	150	1729	1.21	14.1	Relief modéré
O. El Kébir amont Douar Tassadane	936	929	380	1662	1.14	35.3	Relief « fort »
Oued Bou Siaba à El Milia	470	400	27	1345	1.24	37.1	Relief « fort »
Oued Kébir Rhumel à El Ancer	8710	749	15	1729	1.21	12.1	Relief modéré
Ensemble du bassin du Kébir Rhumel	8795	738	0	1729	1.22	11.8	Relief modéré

Tableau 2 : Caractéristiques morphométriques de l'ensemble du bassin Kébir Rhumel contrôlés par des stations hydrométriques (MEBARKI, 1982)

3.4 Contexte hydrogéologique

Parmi les facteurs de prédisposition, les conditions d'écoulement de surface et hydrogéologiques constituent des facteurs environnementaux régissant les conditions hydrauliques *in situ*. Or, la présence d'une nappe phréatique rend plus complexe le phénomène de retrait-gonflement.

En effet, les conditions hydrauliques *in situ* (teneur en eau et degré de saturation) varient dans le temps, non seulement en fonction de l'évapotranspiration (dont l'action est prépondérante sur une tranche très superficielle de l'ordre de 1 à 2 m d'épaisseur), mais aussi en fonction des fluctuations de la nappe éventuelle (dont l'action devient prépondérante en profondeur). Ces variations hydriques des sols se traduisent, pour des formations argileuses sensibles, par des variations de leurs caractéristiques mécaniques.

La présence d'une nappe permanente à faible profondeur permet généralement d'éviter la dessiccation de la tranche de sol superficielle. Inversement, un rabattement de cette nappe (sous l'effet de pompages ou d'un abaissement généralisé du niveau), ou le tarissement naturel des circulations d'eau superficielles en période de sécheresse, aggrave la dessiccation de la tranche de sol soumise à l'évaporation.

Ainsi, dans le cas d'une formation argileuse surmontant une couche sablo-graveleuse, un éventuel dénoyage de cette dernière provoque l'arrêt des remontées capillaires dans le terrain argileux et contribue à sa dessiccation.

Les formations quaternaires : les alluvions récentes formées le long des oueds que les terrasses, les formations de pente, les glacis souvent encroûtés et les croûtes calcaires du Quaternaire ancien (Villafranchien).

Bien que leur épaisseur soit généralement faible, ces formations ont une extension spatiale considérable (près de 2500 km²), ce qui détermine des nappes phréatiques plus ou moins continues et facilement exploitables. Elles sont largement répandues dans la zone des hautes plaines, paradoxalement là où les précipitations sont les plus faibles.

Le coefficient d'infiltration concernant ces formations serait de 4%. Les nappes localisées au niveau des vallées sont étroitement liées aux cours d'eau et ont une influence directe sur le régime hydrologique, alors que les nappes phréatiques des plaines de remblaiement quaternaire sont, en partie, en relation avec les massifs calcaires; mais l'alimentation de ces dernières, reste tributaire des précipitations atmosphériques.

Les formations gréseuses (grès numidiens), d'âge Oligocène, affleurent essentiellement dans le bassin moyen, mais dans des secteurs limités dont 170 km² à l'intérieur de la wilaya de Mila.

Les formations à faible capacité de rétention souterraine : cet ensemble regroupe le reste des formations dont la nature lithologique est très variée, mais ce sont les séries à dominance argileuse ou marneuse du Mio-Pliocène continental et du Crétacé-Eocène, qui sont le plus largement représentées.

L'ensemble des roches concernées ont une faible perméabilité d'interstices ou de fissures, ne déterminant donc pas d'aquifères notables. Cependant, compte tenu de leur caractère lithologique particulier, certaines formations méritent d'être brièvement analysées. Il s'agit surtout des **formations à dominance argileuse ou marneuse**, cette série du Mio-Pliocène composée essentiellement d'argiles, de marnes parfois gypsifères, de calcaires lacustres, de conglomérats et de grès, qui mérite l'attention au vu de son extension considérable et son aspect hydrogéologique assez particulier. Cette série est très irrégulière, à la fois dans son épaisseur et dans ses faciès. La porosité efficace y est en moyenne très faible, mais en raison des niveaux travertineux (calcaires lacustres) qu'elles comportent, ces formations possèdent des possibilités d'infiltration dans des secteurs

localisés se traduisant par des points d'eau dispersés (les sources de Marchau, cinq sources qui alimentent la ville de Mila ont un débit global d'environ 13 l/s.

La puissance des calcaires lacustres varie entre 50 et 100 m dans la région de Sidi Mérouane (D. Delga, 1955); elle atteint environ 70 m autour du massif Kheneg (P. Deleau, 1952).

Dans l'ensemble, la circulation des eaux souterraines est commandée par les variations de faciès du remplissage Mio-Pliocène ainsi que par ses ondulations. Il faut noter, par ailleurs, que les nombreuses émergences jalonnant la base des affleurements lacustres sont fortement influencées par les irrégularités du climat, d'où le régime temporaire de plusieurs de ces points d'eau à débit, par ailleurs, modeste. (MEBARKI, 1982).

3.5 Statistiques relatives au facteur de pente

Le diagnostic physico-géographique du sous bassin de la Wilaya de Mila en tenant compte des limites administratives de la Wilaya, nous conduit tout d'abord à réaliser une carte des pentes de la wilaya de Mila (Fig. n° 16), suivie d'une analyse statistique relative au facteur de pente (Tableau 3). La carte des pentes et les statistiques associées traduisent un relief modéré sur presque 90% de la superficie de la wilaya de Mila, seulement 10% de la surface représente les piedmonts et les montagnes de la région. Cette structure en plan favorise l'accumulation des eaux de pluies pendant des longues périodes de l'année et qui permet au sol argileux de s'imbiber d'eau lentement et de se gonfler en présence des minéraux comme les smectites et les interstratifiés.

facteur pente					
Classes	Area (Km²)	%			
0-4°	1239	35,38			
4-9°	1134	32,38			
9-16°	760,92	21,73			
16-25°	285,56	8,15			
25-71	82,20	2,35			
Total	3501,68	100			

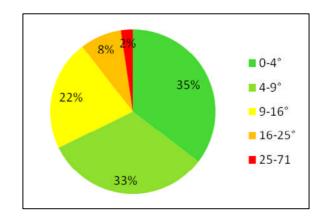


Tableau 3 : Statistiques relatives au facteur de pente

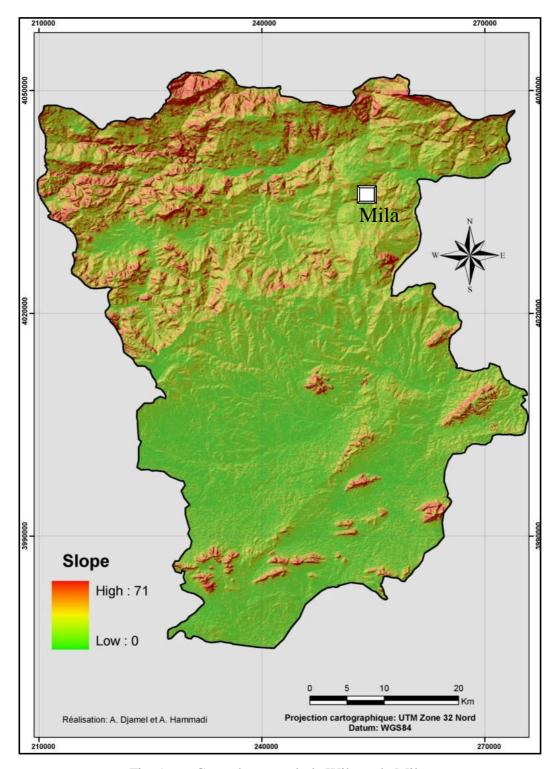


Fig. 16 : Carte de pente de la Wilaya de Mila

3.6 Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est bien développé de l'amont à l'aval du bassin, la jonction de deux oueds principaux : oued Endja à la limite NW du bassin versant et oued El Kebir qui allonge la limite NE, est très nette au Nord de Grarem (Fig. 17).

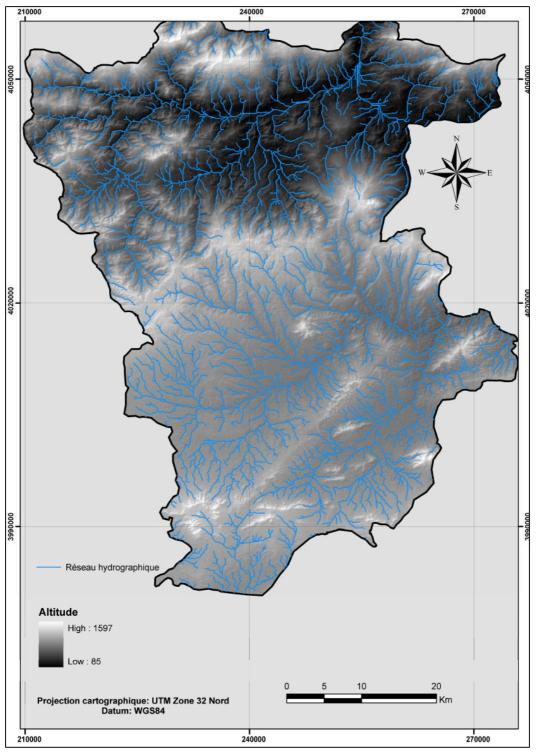


Fig. 17 : Carte actuelle du réseau hydrographique « après la mise en eau du barrage Beni Haroun » à l'intérieur des limites administratives de la Wilaya de Mila

3.7 Types et densités de drainage

Il est possible de délimiter trois grandes parties de bassin s'identifiant plus ou moins aux grands domaines morphostructuraux :

- Le bassin supérieur : correspondant à l'Oued Rhumel et l'Oued Bou Merzoug jusqu'à leur confluence à l'amont de Constantine ;
- Le bassin moyen: formé par l'Oued Enndja et l'Oued Rhumel inférieur à l'aval de Constantine jusqu'à leur confluence aux environs de Sidi Merouane;
- *Le bassin inférieur* : correspondant à l'Oued El Kébir, à l'aval de la confluence Enndja-Rhumel.

On relève dans les différentes parties du bassin-versant indiquées ci-dessus des types différents de drainage. Dans le bassin inférieur et plus particulièrement dans sa partie Ouest, le drainage est de type *orthogonal*. Ce dernier a été le plus souvent guidé par les failles et les chevauchements affectant cette région. La disposition du réseau hydrographique est semblable dans une bonne partie du bassin moyen, notamment au niveau de l'Oued Enndja où l'influence de la tectonique a été déterminante dans la mise en place du réseau. Dans ces secteurs accidentés, la fréquence élevée des confluences et la forte densité de drainage, jointes le plus souvent à de fortes pentes, favorisent des crues rapides et puissantes.

En revanche, dans le bassin supérieur où les grandes lignes du réseau hydrographique ont été déterminées par le phénomène de subsidence – en appelant les eaux vers les fossés d'effondrement – et par l'orientation générale SW-NE des plis tectoniques, le drainage est de type *dendritique*, la hiérarchisation du réseau étant, néanmoins, loin d'être parfaite. Les affluents sont de longueurs souvent inégales et les points de confluence plus éloignés, ce qui, à priori favorise moins la concentration des crues dans ce secteur aux pentes faibles.

L'opposition entre les secteurs Sud et Nord du bassin du Kébir-Rhumel est encore plus marquée par les densités de drainage.

Les calculs de la densité de drainage total, permanent et temporaire pour les principaux bassins contrôlés par des stations hydrométriques, sont présentés dans le tableau (Tab. 4) :

Bassin	D_d	$D_{d(p)}$	$D_{d(p)}/D_d$	$D_{d(t)}$	$D_{d(t)}/D_d$
			(%)		(%)
Oued Rhumel à O. Athmenia	0.64	0.21	33	0.43	67
Oued Rhumel à Ain Smara	0.68	0.27	40	0.41	60
O. Bou Merzoug à El Khroub	0.68	0.18	26	0.50	74
Oued Rhumel à Grarem	0.70	0.31	44	0.39	56
O. El Kébir amont Douar Tassadane	0.77	0.48	62	0.29	38
Oued Bou Siaba à El Milia	0.72	0.70	97	0.02	3
Oued Kébir Rhumel à El Ancer	0.74	0.43	58	0.31	42
Ensemble du bassin du Kébir Rhumel	0.74	0.43	58	0.31	42

Tableau 4 : Densités de drainage

 $\mathbf{D_d}$: densité de drainage total = L/A; avec L: longueur totale en (km) des drains permanents et temporaires; A: surface du bassin en (km²);

 $D_{d(p)}$: densité de drainage permanent (L étant la longueur des talwegs qui coulent en permanence).

 $\mathbf{D}_{d(t)}$: densité de drainage temporaire (L étant la longueur des talwegs qui coulent temporairement).

La densité de drainage permanente reste en moyenne assez faible dans le bassin de l'Oued Rhumel à l'amont de Grarem, vu l'influence du cours d'eau supérieur drainant les hautes plaines.

Dans sa thèse Mr Mebarki porte des critiques concernant les données de la densité de drainage qui ne traduit pas la réalité du chevelu hydrographique parce qu'elles ont été établies à partir des cartes topographiques au $1/200.000^{\rm ème}$. Il propose alors un facteur de correction 4 à 6 fois plus élevées que celles établies à partir du $1/200.000^{\rm ème}$.

Notre approche par images satellitaires et le système « SIG », confirme cette mésestimation de la densité de drainage qui peut atteindre dans le cas de notre terrain aux alentours du chef lieu de la wilaya de Mila, la valeur de 2.8 au lieu de 0.7 mentionnée dans la thèse de Mr Mebarki. (Tab. 5 et Fig. 18).

Densité de	Surface	Surface	%	Observation
drainage		Cumulée		
0.08-0.93	613	613	17.50	
0.93-1.87	1547	2160	44.17	
1.87- 2.8	843	3003	24.07	
2.8-3.73	326	3329	9.30	
3.73-4.66	120	3449	3.42	
4.66-5.59	37	3486	1.05	
5.59-6.52	11	3497	0.3	
6.52-7.45	4	3501	0.11	
7.45-8.38	1	3502	0.02	

Tableau 5 : Statistiques relatives à la carte de la densité de drainage.

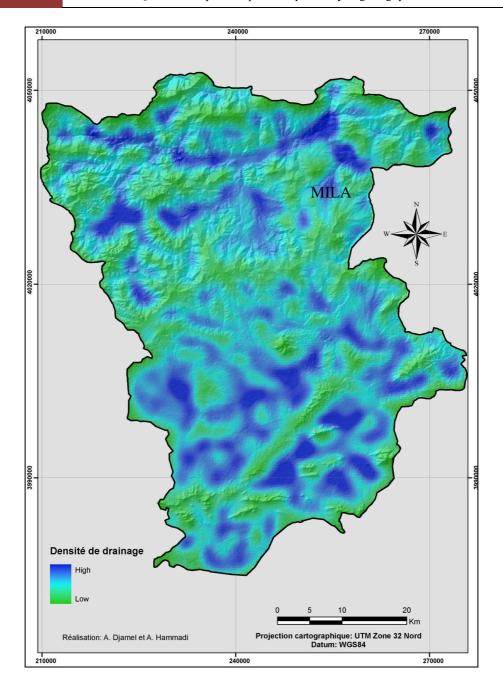


Fig. 18 : Carte de densité de drainage de la Wilaya de Mila



3.8 Climat et Végétation

3.8.1 Analyse des caractéristiques Climatiques :

On peut distinguer deux domaines climatiques différents qui règnent au niveau de la zone étudiée : un climat tempéré et humide au Nord caractérisé par un été sec et chaud et un hiver doux et humide avec des précipitations annuelles variant entre 900 et 1200 mm et un climat semi aride au Sud, marqué par un écart des températures qui avoisinent 40°C en été et qui peuvent descendre au dessous de 0°C en hiver et des précipitations de l'ordre de 400 mm/an.

3.8.2 Pluviométrie: (Tab. 6)

Le Nord de la Wilaya de Mila se situe dans une zone où la pluviométrie moyenne interannuelle est entre 600 et 700 mm. Tandis que la partie centrale et Sud de la Wilaya n'enregistre que des moyennes interannuelles inférieures à 400 mm/an.

La station la plus proche de la ville de Mila est celle de Hamala Grarem de coordonnées Lambert (X = 821503; Y = 362968).

saison		valent de 2			336.60 mm l'équivalent de 49.88%			171.07 mm l'équivalent de 25.35%			17.85 mm 1'équivalent de 2.64%		
Moy.		149.26 mn			336 60 mm			171 07 m	n	1	7.85 mr	n	
Moy. mois	27.00	34.90	07.30	144.92	119.80	/1.82	70.21	01.07	33.19	11.13	3.17	3.33	0/4.8
Total	378.00 27.00	769.50 54.96	992.30 67.30	2028.90	1678.17 119.86	931.40 71.82	1067 76.21	863.34	464.70 33.19	155.8 11.13	44.4 3.17	49.7 3.55	9214 674.8
1997	30.00	70.00	160.00	140	87.47	80.00	63.00	76.00	18.00	17.90	03.0	05.0	750.4
1996	32.00	50.00	49.20	60.00	140	30.00	18.00	28.50	15.90	16.00	00.0	16.50	456.1
1995	43.20	40.30	96.70	47.80	85.80	35.00	91.00	81.50	50.40	13.12	00.0	00.0	541.8
1994	41.50	79.80	92.00	84.80	200	40.00	90.00	35.00	04.60	58.80	00.0	00.0	726.5
1993	19.00	00.00	40.50	225	100	28.98	8.00	00.00	00.00	00.00	00.0	00.0	421.5
1992	21.50	20.00	35.00	250	110	95.50	50.00	41.70	60.50	08.00	4.96	10.0	702.2
1991	11.50	96.20	42.00	20.00	100	74.00	82.00	170	72.00	14.00	15.5	00.0	697.2
1990	0.00	08.00	150.00	250	78.50	100	95.00	76.00	60.40	00.00	00.0	00.0	817.9
1989	36.70	102.10	50.40	27.00	140	00.00	34.00	55.00	60.90	00.00	10.0	12.5	528.6
1988	24.40	0.00	40.30	300	100	64.00	62.00	107	16.00	00.00	00.0	05.7	717.5
1987	11.30	25.80	53.30	23.30	110.70	105	100	48.24	20.00	20.50	00.0	00.0	518.1
1986	14.90	50.80	120.30	157.80	105.70	230	94.00	58.80	40.00	00.00	00.0	00.0	639.4
1985	47.0	26.50	49.50	63.20	200	80.00	120	37.70	08.00	07.50	00.0	00.0	639.4
1984	45.0	200	13.10	380	120	43.00	160	47.90	38.00	00.00	11.0	00.0	1058
année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Total

Tableau 6 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1984-1997) ; (Station Hamala Grarem).

Ces données montrent que la moitié de la lame d'eau reçue par le bassin versant c'est celle de l'hiver (50.80%, station de Beni Haroun; 49.88% enregistrée par la station de Hamala Grarem).

3.8.3 Température : (Tab. 7)

La température moyenne inter-annuelle est égale à 17.43°C; les mois de juin, juillet, août et septembre sont les plus chauds de l'année, la moyenne du mois de juillet est aux alentours de 27.57°C.

année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Moyenne
1984	22.94	18.74	13.70	9.78	9.98	11.0	11.95	14.71	18.07	22.89	27.41	26.80	17.25
1985	22.84	18.49	14.0	9.98	8.23	10.88	12.16	14.99	18.97	23.59	27.90	27.50	17.46
1986	22.19	18.29	13.25	9.93	8.48	10.72	11.97	14.50	18.27	23.89	28.00	27.97	17.28
1987	24.09	19.64	13.30	10.33	10.17	9.90	11.82	14.46	18.98	23.29	27.60	28.12	17.64
1988	22.94	18.89	13.75	10.18	8.78	10.80	12.93	14.30	18.97	23.84	27.62	27.32	17.52
1989	22.49	18.94	13.25	10.63	8.48	11.17	12.96	14.36	18.67	23.34	27.16	27.42	17.40
1990	23.74	18.89	12.65	9.83	9.98	10.60	12.56	14.46	17.92	24.14	26.66	26.33	17.33
1991	23.79	18.69	13.70	9.75	8.53	9.87	12.70	14.31	18.82	22.54	26.76	27.00	17.20
1992	23.69	18.74	12.25	9.98	8.23	10.72	12.76	14.06	17.97	22.69	27.16	26.80	17.08
1993	23.64	18.64	13.20	10.80	8.88	10.92	13.98	16.51	18.02	23.59	27.11	27.42	17.72
1994	22.64	18.54	13.00	9.78	8.93	10.97	12.50	14.52	19.02	23.54	30.76	28.60	17.73
1995	22.70	18.92	13.20	10.50	8.70	11.00	12.60	15.59	18.59	24.20	27.30	27.15	17.53
1996	23.49	18.60	13.50	9.81	9.01	10.87	13.96	15.01	18.40	23.80	27.00	27.25	17.57
1997	22.50	18.50	12.84	10.50	9.88	10.60	13.37	14.20	18.01	23.51	27.50	28.00	17.45
Moy/ mois	23.12	18.75	13.26	10.14	9.01	10.71	12.73	14.71	18.47	23.48	27.57	27.40	17.43

Tableau 7 : Températures moyennes mensuelles en °C durant la période : 1984 – 1997 (Station de Hamala).

3.8.4 Graphe Ombro-thermique:

En étudiant la relation entre la température moyenne mensuelle et les précipitations totales du mois (Fig.19 et 20), on peut constater que :

- La courbe de précipitation se situe au dessus de la courbe thermique du mois de Novembre à la fin d'Avril, tandis que du début de Mai jusqu'à la fin d'Octobre, la courbe thermique se trouve au dessus de celle de la pluviométrie.
- La période sèche s'étend du mois d'Avril au mois d'Octobre. Cette période s'étale sur plusieurs mois secs successifs.

Un mois sec est définit selon Gaussen et Bagnouls comme celui ayant un total de précipitation égal ou inférieur au double de la température moyenne du même mois (P≤ 2T).

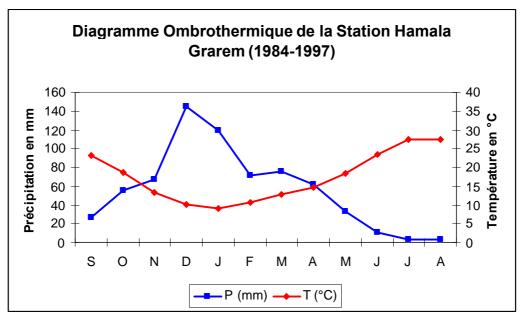


Fig.19: Graphe Ombro-thermique correspondant à la station Hamala Grarem

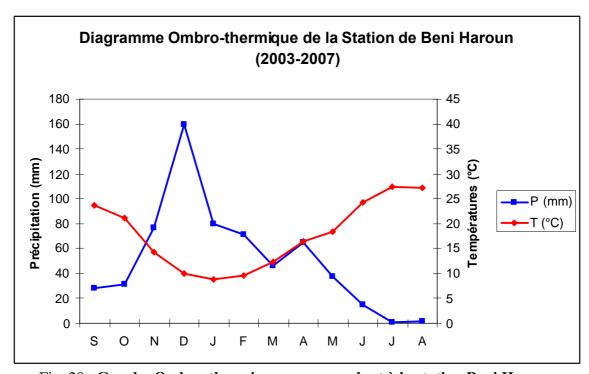


Fig. 20: Graphe Ombro-thermique correspondant à la station Beni Haroun

3.8.5 Répartition saisonnière des précipitations :

Afin d'illustrer la pluviométrie moyenne mensuelle au niveau du bassin versant de la région de Mila, on a élaboré les graphiques de pluviométrie saisonnière (Figure 21 et tableau 8), on remarque que presque la moitié de la lame reçue par le bassin versant se manifeste en hiver.

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Quantité (mm)	96.91	129.66	122.45	32.88
Quantité (%)	26.05	34.86	32.92	8.84

Tableau 8 : Répartition saisonnière des précipitations.

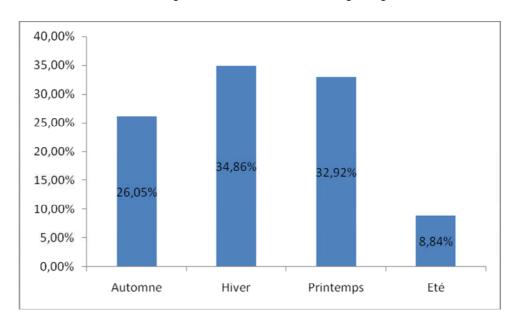


Fig. 21: Précipitation moyenne mensuelle en mm (station de Hammam Grouz)

Le régime thermique traduit que l'hiver très riche en précipitation, et très froid, par contre l'été est quasi-sec et chaud.

L'analyse de se diagramme montre que, la période humide débute de la fin d'octobre, jusqu' à la fin du mois de mai, tandis que la période sèche qui commence à partir de début du mois de juin, se prolonge jusqu' au mois d'octobre.

D'après l'indice d'aridité et selon A. MEBARKI, la wilaya de Mila se subdivise en deux domaines : un domaine semi aride au Sud et au centre ; l'autre domaine sub-humide ce concentre dans la partie Nord de la wilaya (Fig. 22).

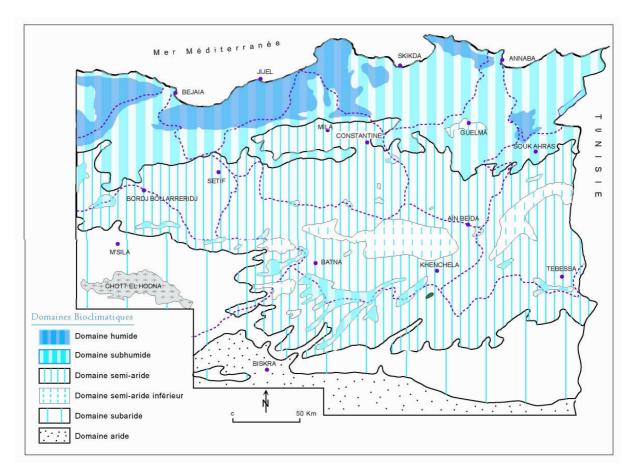


Fig.22 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (D'après Mebarki A., 2005).

3.8.6 Végétation

Il est désormais avéré que la présence de végétation arborée à proximité d'une maison peut constituer un facteur déclenchant du phénomène de retrait-gonflement, même s'il n'est souvent qu'un facteur aggravant de prédisposition. En effet, les racines soutirent par succion (mécanisme d'osmose) l'eau du sol. Cette succion crée un gradient de la teneur en eau du sol qui peut se traduire par une dépression locale autour du système radiculaire.

Ce phénomène de succion peut donc provoquer un tassement localisé du sol autour de l'arbre. Si la distance au bâtiment n'est pas suffisante, cela entraînera des désordres dans les fondations. On considère en général que l'influence d'un arbre adulte se fait sentir jusqu'à une distance égale à une fois et demi sa hauteur.

Il est à noter que les racines seront naturellement incitées à se développer en direction de la maison, puisque celle-ci s'oppose à l'évaporation et qu'elle maintient donc une zone de sol plus humide sous sa surface. Contrairement au processus d'évaporation, qui affecte surtout la tranche superficielle des deux premiers mètres, les racines d'arbres ont une

influence jusqu'à 4, voire 5 m de profondeur. Le phénomène sera d'autant plus important que l'arbre est en pleine croissance et qu'il a, de ce fait, davantage besoin d'eau.

La végétation est aussi la résultante des facteurs : climat, relief et lithologie auxquels s'ajoute le facteur humain (déboisement et mise en cultures, reboisement). Le rôle de la végétation dans la stabilité du sol ou dans l'écoulement ne saurait être négligé.

Il existe une classification des types de végétation par ordre de densité proposée par J. Tricart (1963, 1968). Cette classification permet de distinguer dans le sous bassin de Mila les catégories suivantes : (Fig. 23)

- Surfaces bien protégées en permanence (13,4%), donc défavorables au ruissellement et à l'érosion hydrique : forêts, prairies naturelles.
- Surfaces protégées incomplètement par la couverture végétale (55,6%), où les averses tombant sur les parties du sol non protégées peuvent engendrer un ruissellement plus ou moins violent et exercer une érosion plus ou moins importante.
- Surfaces mal protégées ou nues (31%), où le ruissellement et l'érosion hydrique sont largement favorisés.

En plus de cette classification et son application au bassin de Mila, notre travail de télédétection nous à permis de clarifier et de donner plus de précision à l'intérieur de la wilaya de Mila, l'indice de végétation normalisé (NDVI), permet de distinguer par surface et pourcentage des différents classes mentionnées dans le tableau (Tab. 9) suivant y compris la surface d'eau des lacs, des barrages et cours d'eau.

NDVI	Surface	Surface	%	Observation
		Cumulées		
-0.86 à -0.22	1.75	1.75	0.049	Eau pure
-0.22 à 0.05	283.25	285	8.08	Très faible à nulle
0.05 à 0.21	1870	2155	53.39	Faible
0.21 à 0.40	805	2960	22.98	Faible à modérée
0.40 à 0.82	542	3502	15.47	Modérée à forte

Tableau 9 : Statistiques relatives à l'indice de végétation normalisé.

(Normalized Difference Vegetation Index): (NDVI) = (P IR - R)/(P IR + R), avec:

P IR: canal proche infrarouge; R: canal rouge; V: canal vert

Cet indice est très fortement corrélé à l'activité chlorophyllienne des feuilles. En effet, les pigments chlorophylliens absorbent fortement dans le rouge et les feuilles réfléchissent par contre fortement dans le proche infrarouge. Le NDVI est donc utilisé pour la détection de la végétation active.

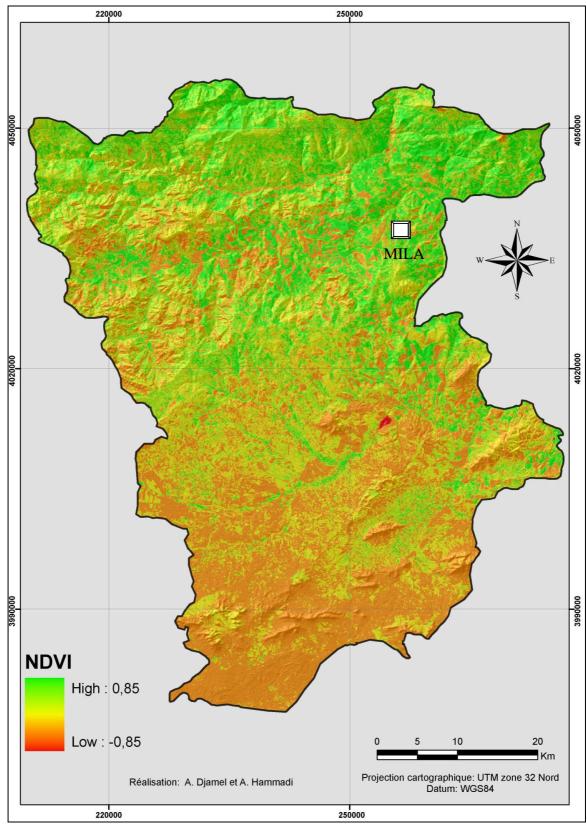


Fig. 23 Carte d'indice de Végétation (NDVI)

3.9 Conclusion:

L'eau et le contraste thermique sont deux facteurs qui jouent un rôle important dans l'apparition des phénomènes de retrait-gonflement, ceci amplifie la dégradation des propriétés mécaniques et chimiques des sols et des roches de la région étudiée. Cette désagrégation modifie considérablement les caractéristiques mécaniques des formations superficielles.

Les conditions hydrologiques et hydrogéologiques du site étudié jouent un rôle très important dans le déclenchement d'un phénomène de retrait-gonflement des argiles. Cette influence est liée principalement aux aspects suivants :

- La quantité importante des eaux d'infiltration au niveau du site étudié constitue le facteur principal d'imbibition des couches d'argile et leur humidification pendant la saison d'hiver ce qui permet leur gonflement et l'inverse en été ce qui pourra se traduire par l'apparition des problèmes d'instabilité. Ces eaux d'infiltration saturent le terrain de couverture argileuse et lubrifient la surface de contact entre cette couverture et les formations sous jacentes, ce qui conduit au déclenchement des mouvements superficiels. Ces derniers se manifestent par d'importantes coulées boueuses et glissements superficiels. Par ailleurs, ces infiltrations participent à l'apparition brusque de glissements profonds affectant les formations néogènes le long des couloirs des accidents tectoniques.
- La dégradation progressive, du pied du versant de la ville de Mila, par la nappe superficielle de l'oued Rhumel engendrant la suppression de la butée de pied de ce versant.
- Les circulations des eaux souterraines le long des couloirs des grands accidents peuvent engendrer des phénomènes de dissolution des formations solubles (carbonates et gypse) et un soutirage des fines (argiles), ce qui entraînerait la fragilisation progressive des formations et la dégradation de leurs caractéristiques mécaniques.

ÉTUDE MINÉRALOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE DES ARGILES DE MILA

4.1 Introduction

Les minéraux argileux peuvent être étudiés à différentes échelles, de l'atome au paysage avec des méthodes appropriées. L'observation de lames minces permet une approche micro-morphologique qui consiste à étudier la distribution des argiles dans la roche sédimentaire ou les sols. L'agencement des particules argileuses s'étudie via la microscopie électronique à balayage (MEB) ; la morphologie des particules s'observe plutôt au microscope à transmission (MET, TEM). Le degré d'hydratation des assemblages argileux s'obtient via des analyses thermiques différentielle (ATD, DTA) ou thermogravimétrique (ATG, TGA). L'étude à l'échelle moléculaire est obtenue par spectroscopie électronique à transmission à haute résolution (HRTEM). La composition minéralogique des assemblages argileux est déduite par la diffraction des rayons X (DRX, XRD).

A l'exception de la DRX, les méthodes d'études ne s'appliquent généralement que sur des phases argileuses pures ou simples. Les résultats sur phase mixte, par exemple des assemblages argileux naturels de sols, sédiments ou roches sédimentaires, ne sont pas interprétables.

4.2 L'observation de lames minces : Les Eléments Terrigènes Constitutifs Des Roches Sédimentaires Siliceuses: Lithoclastes S.L.

A. Endoclastes

«Galets mous » argileux, formés lors de remaniements intraformationnels, alors qu'ils ne sont pas totalement indurés. (Fig. 24)

Reconnus par leur extension latérale limitée et par leur parallélisme vis-à-vis de la stratification (grains allongés, aplatis).

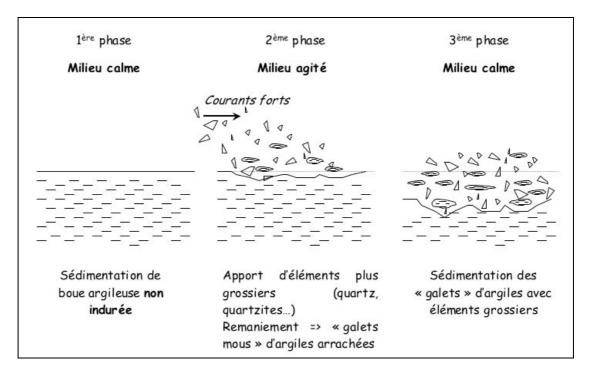


Figure 24 : Étapes de formation des Endoclastes

B. Exoclastes

Galets (argiles, quartzites, ici granites...) apportés depuis l'extérieur du bassin à l'état lithifié (Fig. 25) : la forme des galets est anguleuse.

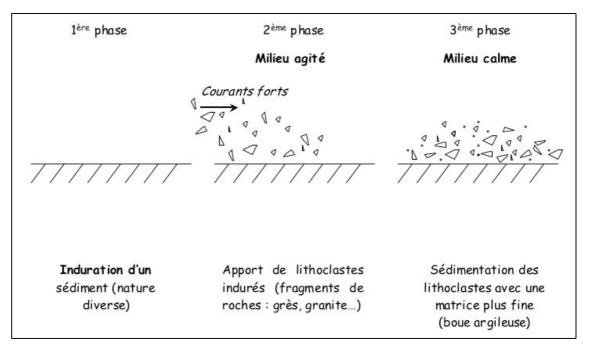


Figure 25 : Étapes de formation des Exoclastes

4.3 Effets de la Bioturbation sur les Propriétés Géotechniques des Sédiments du Bassin de Mila.

La bioturbation accélère les phénomènes de drainage, en plus de modifier la granulométrie. Le sédiment étant plus grossier lorsqu'il est bioturbé, le poids volumique de celui-ci augmente, ce qui se traduit par une diminution de la teneur en eau et de l'indice de liquidité. Un autre rôle de la bioturbation est l'augmentation de la résistance du sédiment (cimentation ou autres phénomènes chimiques). La bioturbation se faisant de façon hétérogène, la variabilité des propriétés géotechniques est donc plus prononcée dans les zones bioturbées.

La bioturbation augmente la résistance du sédiment à l'état intact et remanié.

La porosité des échantillons consolidés est plus fermée, à cause de la contrainte de consolidation de 200 kPa.

La caractérisation géotechnique et microstructurale a permis d'illustrer les effets de la bioturbation sur les sédiments d'argiles. L'étude au microscope polarisant et celui de MEB ont permis d'observer les modifications sur la porosité de la matrice par la présence de structures biogènes. Ce qui indique que les mesures de résistance au cisaillement peuvent être surestimé dans certaines couches où la bioturbation est très importante. En effet, on peut estimer l'importance de ces structures dans les sédiments d'argile et argile marneuse de Mila avec des pourcentages de 35% dans certains cas. De plus en surface, l'indice des biopores est faible mais atteint très vite sont maximum en profondeur là où les structures biogènes ne sont pas détruites par les organismes de surface. L'indice des biopores (absolue et relative), est évalué relativement à la densité du sédiment. En effet, les techniques en laboratoire de mesure des propriétés mécaniques ne tiennent pas compte des

structures biogènes et du biais qu'elles introduisent. L'indice des biopores a été développé afin d'être éventuellement utilisé comme facteur correctif sur des mesures prises pour des cas où les sédiments sont très bioturbés tels que le cas présenté du Bassin de Mila.

OBSERVATIONS AU MICROSCOPE POLARISANT DES ÉCHANTILLONS DE LA ROUTE CW52 MILA

Sondage n°1

➤ Profondeur [8.80 – 9.20m] : Argile marneuse, échantillon (**code 9**) ; l'examen des lames minces à révélée que l'argile présente une silification, bioturbation et quartz de taille (diamètre ø qui atteint 50µm) ; échelle 2mm

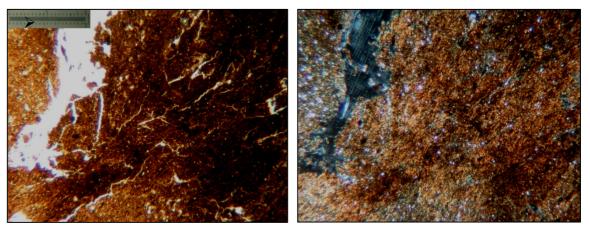


Figure 26: photographie de l'échantillon (code 9) sous microscope polarisant

➤ Profondeur [10.80 – 11.20m] : Argile marneuse, échantillon (**code 8**) ; argile de bioturbation, présence de quartz de diamètre qui atteint 50µm et empreintes de lamellibranches.

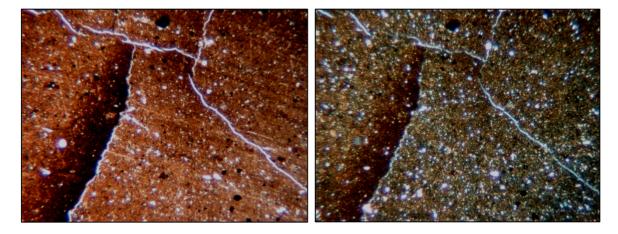


Figure 27: photographie de l'échantillon (code 8) sous microscope polarisant

➤ Profondeur [14.00 – 14.45m]: Argile marneuse, échantillon (**code 10**); il s'agit toujours d'une argile qui contient du quartz fin de diamètre (Ø) qui atteint 30µm de couleur grise répartit de manière concentré sous forme de traces, bioturbation, une silification et pas d'organismes.

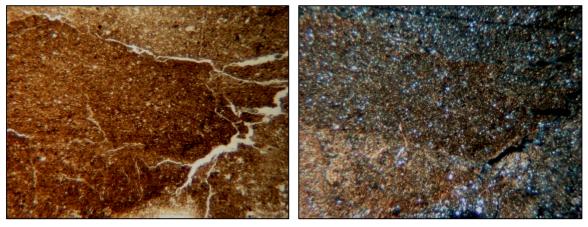


Figure 28: photographie de l'échantillon (code 10) sous microscope polarisant

Sondage n°2

➤ Profondeur [6.60 – 7.0m]: Argile sableuse (**code 12**); la lame préparée correspond à une argile, présence de carbonates sous forme de petites concentrations et un quartz de diamètre qui atteint 30µm; ici on note la présence d'une **Globigérine**.

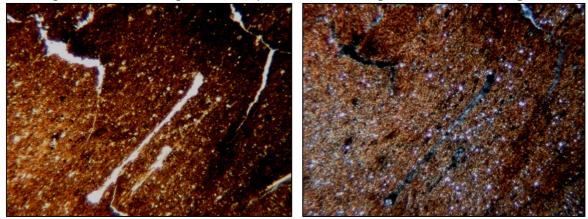


Figure 29: photographie de l'échantillon (code 12) sous microscope polarisant

➤ Profondeur [13.65 – 13.85m] : Argile sableuse (**code 6**); argile à débris carbonatés et silification, peu de quartz 50µm, bioturbation et pédogenèse qui correspond à la transformation ou la différenciation des sols suite à des processus physiques, chimique et biologiques) dans les carbonates.

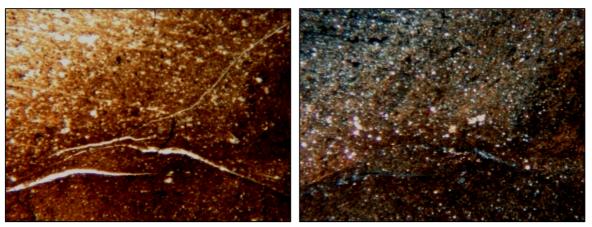


Figure 30: photographie de l'échantillon (code 6) sous microscope polarisant

Sondage n°4

➤ Profondeur [3.0 – 3.40m] : Argile (code 7) ; l'argile renferme des lithoclastes avec fragments carbonatés, morceaux de lamellibranches, bioturbation et pédogenèse, le quartz ici a un diamètre de 50µm et présence d'un horizon de dissolution.

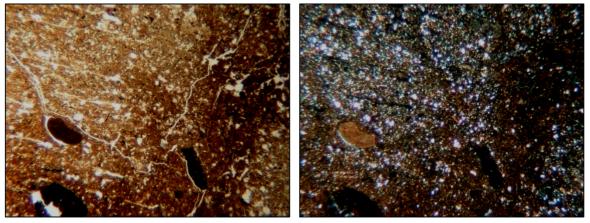


Figure 31: photographie de l'échantillon (code 7) sous microscope polarisant

➤ Profondeur [7.50 – 8.0m] : Argile marneuse (code 2); correspond à une argile avec du quartz concentré à cause de la bioturbation; le quartz a un diamètre de 60µm.

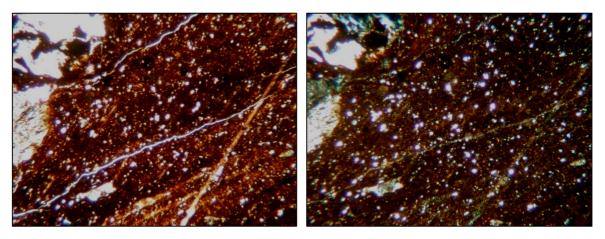


Figure 32: photographie de l'échantillon (code 2) sous microscope polarisant

➤ Profondeur [10.00 – 10.50m]: marne noire (code11); l'abondance de carbonates indique bien l'aspect marneux de la lame que celui argileux, on note aussi l'absence quasi-totale du quartz.

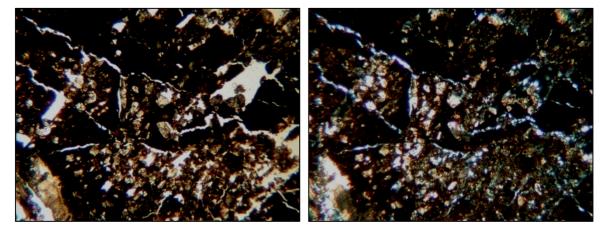


Figure 33: photographie de l'échantillon (code 2) sous microscope polarisant

Sondage n°5

Profondeur [4.75 – 5.35m]: Argile (code 4); une argile renfermant du quartz de granulométrie moyenne dont la taille est 60μm, avec quelques organismes sous forme de fragments de lamellibranches et fragments de boues.

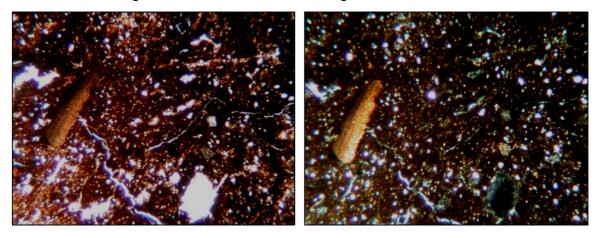


Figure 34: photographie de l'échantillon (**code 4**) sous microscope polarisant **Sondage n°6**

Profondeur [2.70 – 3.3m]: Argile (code 5); argile à grands morceaux de lithoclastes et lamellibranches, le quartz il est généralement de taille 50μm, mais par endroits il peut atteindre 250 μm; présence aussi des lithoclastes carbonatés.

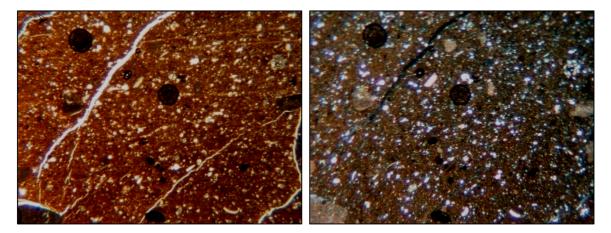


Figure 35: photographie de l'échantillon (code 5) sous microscope polarisant

▶ Profondeur [7.80 - 8.20]: Argile (code 1); argile de bioturbation, peu de quartz.

Figure 36: photographie de l'échantillon (code 1) sous microscope polarisant

4.4 La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage est basée sur l'interaction entre un faisceau d'électron et une matrice cristalline ou non. Le faisceau d'électrons secondaires ou celui des électrons rétro-diffusés sont utilisés pour obtenir une image de l'échantillon irradié avec une résolution de l'ordre de 0.01 micron. Cette technique donne des informations sur le relief de l'échantillon, la morphologie des grains et leur agencement.

L'échantillon est placé dans le porte échantillon et calé au moyen de mastic, et sa position est soigneusement repérée afin de connaître la trace du plan horizontal sur les sections verticales. On pulvérise ensuite sous vide une fine couche d'or sur la section et l'on relie l'échantillon au bord du porte échantillon, car celui-ci se charge sous l'impact des électrons.

On a utilisé dans ce travail le microscope électronique à balayage JEOL JSM-U3 du département de géologie de l'ULG. L'ordinateur associé permet de visionner toute la surface de l'échantillon et de choisir une plage représentative. Pour un même échantillon, les photographies ont été prises à diverses échelles.

- Kaolinite sédimentée :

A faible grossissement (photographie 1), il apparaît deux directions d'orientation à 45° de la trace du plan horizontal. Un examen plus détaillé des textures (photographies 2, 3, 4, 5) montre que les particules, en contact face à face, sont groupées en paquets s'appuyant les uns sur les autres en contact bord-face, et qu'il existe deux familles d'angles entre ces paquets : c'est la texture en château de cartes. Ces deux familles d'angles seraient à l'origine des deux directions d'orientation. L'arrangement est très ouvert, il n'y a pas de différences de texture pour des électrolytes différents : nous retrouvons partout le même arrangement face-face des particules et bord-face des paquets.

- Kaolinite consolidée à 50 bars :

Dans la photographie 6, prise à faible grossissement, il n'apparaît plus qu'une seule direction d'orientation, parallèle à la trace du plan horizontal, donc perpendiculaire à la contrainte appliquée. Les photographies 8 et 9 montrent qu'effectivement l'angle des paquets de particules (en contact bord-face) s'est réduit et qu'il a eu également une réduction importante de la taille des espaces poreux. Les paquets de particules ont donc tendance à se disposer horizontalement.

La photographie 7 permet d'étudier en détail l'un des paquets : il est formé d'une quinzaine de particules d'une longueur d'environ 3μ (30000Å) et d'une épaisseur d'environ 0,2μ (2000Å) et l'espacement entre ses particules est de l'ordre de 0,05μ (500Å), distance pouvant correspondre à l'épaisseur de la double couche.

- Kaolinite consolidée à 200 bars :

L'orientation préférentielle manifestée dans la kaolinite à 50 bars se précise, et corrélativement, il y'a une nette diminution de l'espace poreux (photographies 10 et 11). La photographie 12 prise sur une section à 45° du plan horizontal montre à la fois disposition à plat des particules perpendiculairement à la contrainte et leur arrangement vu de profil : il devient difficile de distinguer les paquets de particules : la structure devient plus homogène.

- Illite sédimentée :

Tout comme dans la kaolinite, il n'est pas possible de trouver des différences de structure relatives à un électrolyte donné: s'il y a des différences de structure, ce seront des différences dans l'arrangement même des particules, donc dans un domaine qui se situe hors des possibilités du MEB. La photographie 13 montre une structure alvéolaire spongieuse ou en « nid d'abeille ». Il n'est pas possible de distinguer ici des particules élémentaires (alors que l'analyse granulométrique avait montré que 50% des particules avaient une taille supérieure à 5μ).

- Illite consolidée à 50 bars :

Dans la photographie 16, aucune réelle orientation ne transpire, mais l'orientation peut être marquée par le développement d'une fissilité (photographie 15). La direction de ces microfissures, qui est aussi celle de la trace du plan horizontal marque donc un plan d'orientation préférentielle perpendiculaire à la contrainte. Cette orientation préférentielle ne devient apparente que pour un nombre statiquement important de particules puisqu'à fort grossissement (photographie 16), aucune orientation n'apparaît.

- *Illite consolidée à 200 bars :*

Du fait de la non apparition d'une fissilité comme c'est le cas dans l'échantillon consolidé à 50 bars (et qui est sans doute due à un séchage plus intense), aucune orientation préférentielle n'est décelable dans la photographie 17. Par contre, l'examen d'une section horizontale du même échantillon (photographie 18) montre que les particules ou plutôt les membranes, sont couchées parallèlement au plan de la section et donc perpendiculairement à la contrainte.

- Montmorillonite sédimentée :

Dès la phase de préconsolidation à 0,5 bar, il apparaît une nette orientation (photographie 19). On conçoit fort bien qu'une structure en « nid d'abeille » (ou plutôt spongieuse) comme celle qui est représentée dans la photographie 20 soit peu résistante à la consolidation : tout comme dans l'illite, il se forme des membranes dans lesquelles il n'est pas possible d'individualiser des particules (96% d'inférieurs à 0.5μ); ces membranes se « collent » les unes aux autres (photographie 21), en contact face-face, ce qui donne des unités de grande taille qui se déposeraient à plat, si elles ne se gênaient les unes les autres du fait de leur encombrement. Il se développe ainsi des vides importants, qui doivent faciliter le réarrangement des membranes perpendiculairement à la pression, fut-elle faible. Si la montmorillonite K 0,55 M (photographie 22) présente des indices des vides (e = 0,5) très inférieurs à ceux de la montmorillonite Na 0,55 M (photographie 21), il n'est pas possible de différencier les structures développées dans ces deux systèmes aussi bien que dans les autres.

- Montmorillonite consolidée à 50 bars :

L'orientation préférentielle n'apparaissait que pour un nombre statiquement important de particules : la photographie 23, quoique prise à un plus fort grossissement que la photographie 19, montre une orientation marquée, parallèle à la trace du plan horizontal, donc perpendiculaire à la contrainte.

Sous l'effet de la contrainte, les membranes particulaires ne s'aplatissent pas comme l'on pouvait s'y attendre, mais se plissent. Corrélativement il y'a un effondrement de la structure « spongieuse » et une très nette diminution de l'espace poreux (photographie 24 et 26). Le plan de symétrie des plis est grossièrement parallèle à la contrainte : il est certain que la réaction des bords de la cellule de compression intervient et empêche le matériau de fluer latéralement, d'où les plissotements.

Enfin, une section horizontale (photographie 25) montre de nombreuses traces blanches contournées qui matérialisent le bord de membranes plus ou moins parallèles à la contrainte, ainsi que quelques particules déposées à plat et qui n'ont pas été affectées de plissotements. En particulier, la grosse particules visible au centre de la photographie semble s'être déposée à plat dès la sédimentation et n'a pas été plissée.

- Montmorillonite consolidée à 200 bars :

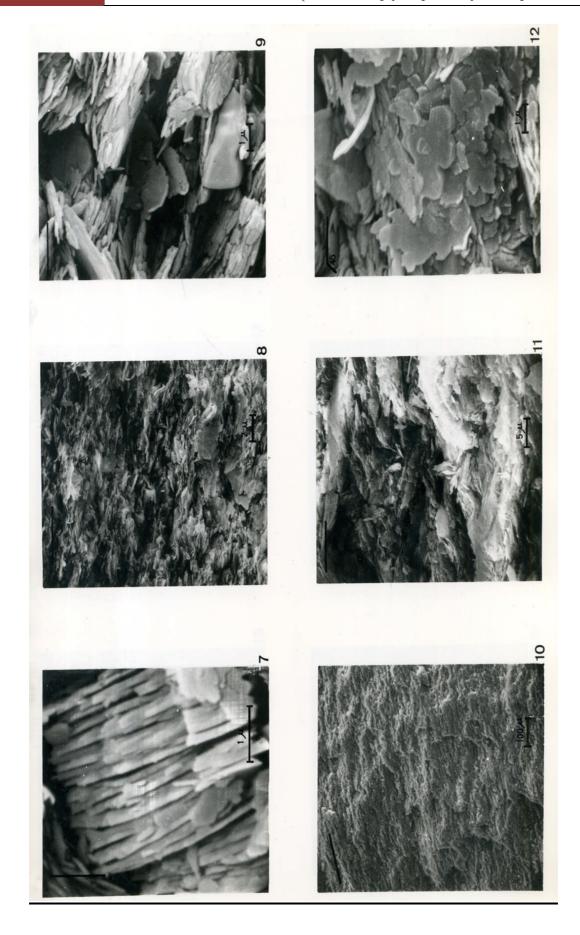
Les échantillons consolidés à 200 bars ne présentent qu'une seule direction d'orientation, perpendiculaire à la contrainte (photographie 27), l'échantillon consolidé à plus de 200 bars montre une cassure en gradins parallèles qui matérialisent donc deux orientations préférentielles perpendiculaires (photographie 29): toutes deux sont parallèles à la trace du plan horizontal. Il y'a donc deux familles de plans d'orientation: la première famille serait perpendiculaire à la contrainte et la deuxième correspondrait aux plans axiaux des plissotements tels qu'on peut les observer par exemple dans la photographie 28 (montmorillonite consolidée à 200 bars). Donc dans une première étape, il se développerait une orientation statistique des membranes qui se plissoteraient (photographies 24 et 28), puis dans une deuxième étape, les directions des plans axiaux des plissotements deviendraient voisines et une deuxième orientation n'apparaîtrait que pour un nombre statistiquement grand de plans axiaux. La photographie 30, effectivement, prise à un fort

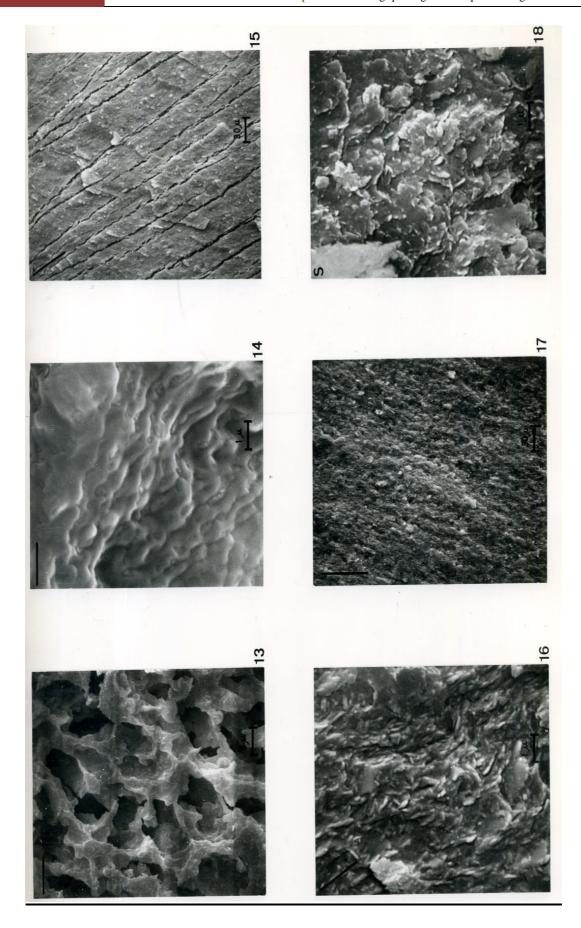
grossissement sur une section à 45° du plan horizontal, donc une section dans laquelle devraient apparaître les deux directions observées sur la photographie 29, ne montre aucune orientation réelle des membranes : celles-ci apparaissent à plat ou sur la tranche. Enfin l'espace poreux est considérablement réduit dans l'échantillon consolidé à plus de 200 bars.

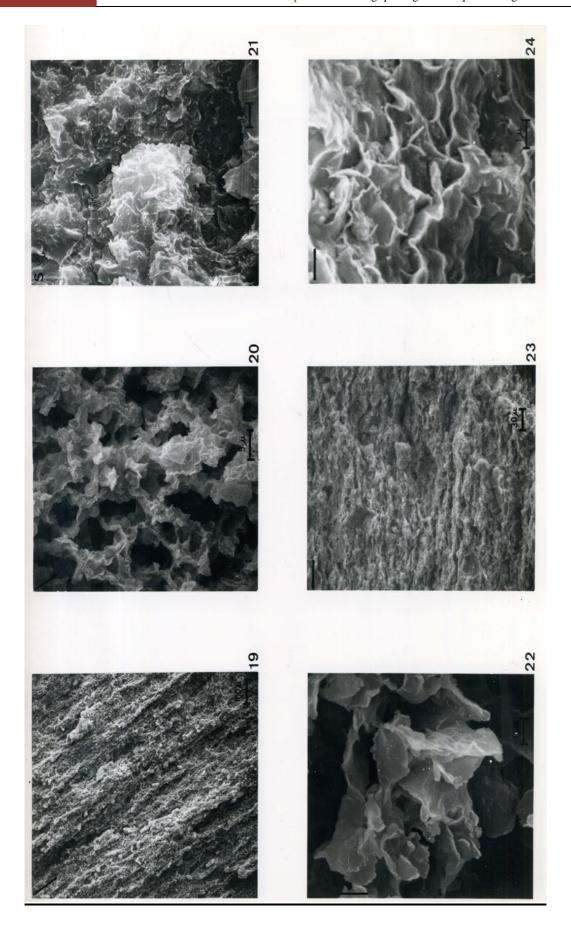
LEGENDE DES PHOTOGRAPHIES

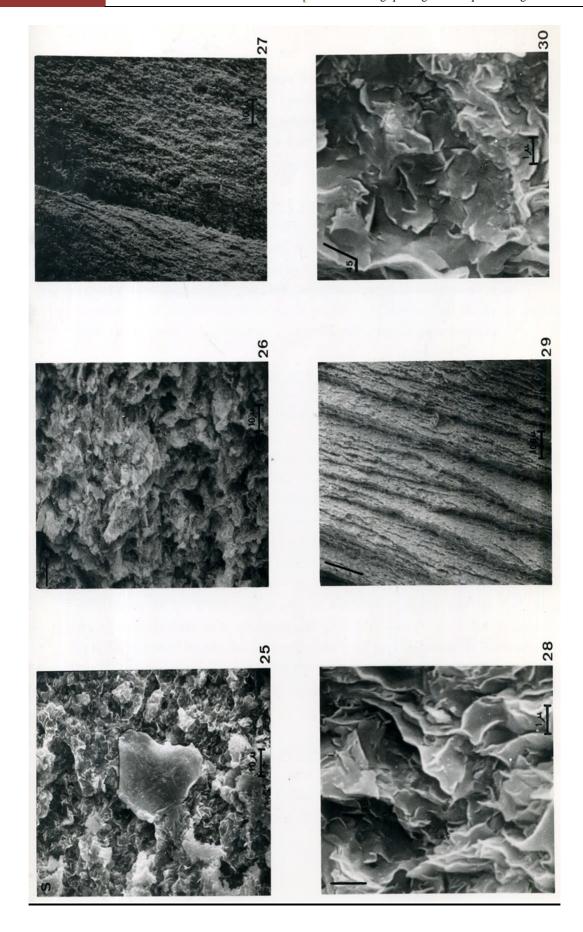
1. 2. 3. 4. 5. 6.	Kaolinite Na 0,55 M, sed. Kaolinite Na 0,55 M, sed. Kaolinite Na 0,55 M, sed. Kaolinite Ca 0,55 M, sed. Kaolinite Mg 0,55 M, sed. Kaolinite Na 0,55 M, 50 bars	(X 100) (X 3000) (X 10000) (X 5000) (X 10000) (X 100)	(section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale)
7. 8. 9. 10. 11.	Kaolinite Na 0,55 M, 50 bars Kaolinite Ca 0,55 M, 50 bars Kaolinite Ca 0,55 M, 50 bars Kaolinite Na 0,55 M, 200 bars Kaolinite Na 0,55 M, 200 bars Kaolinite Na 0,55 M, 200 bars	(X 20000) (X 5000) (X 10000) (X 100) (X 2000) (X 2000)	(section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale)
13. 14. 15. 16. 17. 18.	Illite Na 0,55 M, sed. Illite Na 0,55 M, sed. Illite Na 0,55 M, 50 bars Illite Na 0,55 M, 50 bars Illite Na 0,55 M, 200 bars Illite Na 0,55 M, 200 bars	(X 1600) (X 10000) (X 300) (X 10000) (X 300) (X 10000)	(section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale)
19. 20. 21. 22. 23. 24.	Montmorillonite Na 0,55 M, sed Montmorillonite Na 0,55 M, sed Montmorillonite Na 0,55 M, sed Montmorillonite K 0,55 M, sed. Montmorillonite Na 0,55 M, 50 Montmorillonite Na 0,55 M, 50	(X 2000) (X 3000) (X 10000) bars (X 300)	(section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale)
25. 26. 27. 28. 29. 30.	Montmorillonite Na 0,55 M, 50 Montmorillonite K 0,55 M, 50 Montmorillonite K 0,55 M, 50 Montmorillonite K 0,55 M, 20 Montmorillonite Ca 0,55 M, □ Montmorillonite Ca 0,55 M, □	bars (X 1000) bars (X 300) 0 bars (X 10000) 200 bars (X 100)	(surface) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (section verticale) (à 45° horizontale).











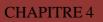




Figure 37: photographie de l'échantillon (code 9) sous MEB

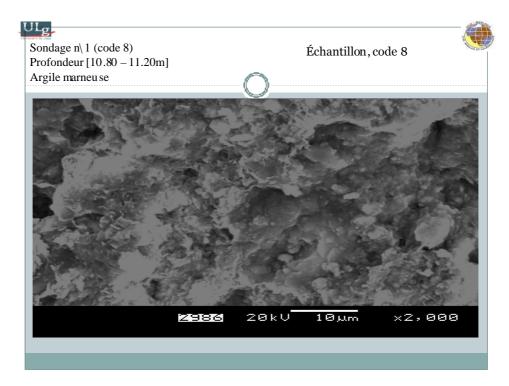


Figure 38: photographie de l'échantillon (code 8) sous MEB

On peut constater que quelque soit la section des échantillons des différents sondages réalisés au mois de Mai 2008 sur le chemin CW52, il s'agit toujours de la kaolinite en majeure partie représentée par des formes hexagonales des feuillets de 02 à 05 µm.

4.5 Analyses par Diffraction X

Préparation des échantillons et analyse minéralogique qualitative et semi-quantitative par diffraction des rayons x des minéraux argileux

Deux méthodes d'investigation minéralogique qualitative et quantitative par diffraction des rayons X (DRX) des matériaux et des minéraux argileux sont classiquement appliquées dans les laboratoires d'analyse. Il s'agit, d'une part, de l'analyse d'une poudre totale sèche et désorientée et, d'autre part, de la fraction argileuse (inférieure à deux microns) extraite du matériau et préparée sous forme d'agrégat orienté.

La première méthode, dite des poudres, fournit les éléments d'une qualification de tous les minéraux présents (quartz, feldspaths, oxydes et hydroxydes de Fe, carbonates, ainsi que de la fraction totale regroupant minéraux argileux et phyllosilicates, sans possibilité sous cette forme de différencier minéralogiquement les minéraux argileux.

Par contre, la fraction argileuse inférieure à 2 microns classiquement analysée n'est pas représentative non plus de toute la gamme de minéraux argileux présents dans le matériau global ceci tant au point de vue qualitatif que quantitatif. L'analyse DRX de cette fraction argileuse (réalisée sous la forme d'agrégats orientés après extraction du matériau global) fournit cependant une bonne estimation à la fois qualitative et semi-quantitative des divers composants argileux, qu'il s'agisse de minéraux simples et/ou interstratifiés présents grâce à l'application de trois tests diagnostiques classiques : séchage de l'agrégat orienté (passage au diffractomètre à l'état dit naturel ou normal, N), après solvatation aux polyalcools (avec l'éthylène glycol,EG, ou le glycérol,Gl) et enfin après chauffage (500°C).

La phase argileuse micrométrique peut comporter une fraction dite "gonflante" (smectite) qu'il convient de mieux caractériser en recourant à des saturations cationiques (K et Li). De tels post-traitements, qui ne sont cependant pas systématiquement appliqués, permettent néanmoins de prédire si les "smectites" sont susceptibles de préserver dans les sites de décharges leurs propriétés de gonflement initial quand elles rentrent en contact avec des fluides contenant certains cations tel le potassium aisément adsorbé dans les espaces interfoliaires.

On ne peut cependant pas raisonnablement envisager en pratique la multiplication d'analyses DRX d'un même échantillon en investiguant toutes les fractions granulométriques et en leur appliquant, à chaque fois, outre les trois tests classiques (N,EG et 500) des post-traitements diagnostiques spécifiques (saturations cationiques). Un tel mode opératoire allongerait considérablement le temps de préparation et de passage au diffractomètre et surtout entraînerait un surcoût des analyses.

Pour pallier la multiplication de tests de caractérisation et réduire également le temps et le coût des analyses DRX, et répondre au problème de la caractérisation des minéraux argileux présents dans le matériau global, on peut envisager-ce qui est d'ailleurs préconisé ici- l'application d'une nouvelle méthode de préparation du matériau. Cette technique a été testée avec succès au LGA de l'ULG. Il s'agit de réaliser l'analyse DRX d'une pâte orientée

du matériau argileux global ou de sa fraction inférieure à 16 microns (obtenue par tamisage sous eau). Parallèlement, on peut compléter cette analyse par celle de la fraction argileuse "classique" (inférieure à 2 microns) tout comme il reste nécessaire d'analyser le matériau argileux séché, préparé sous forme d'une poudre désorientée.

Nous fournissons ci-après les modalités de préparation des matériaux argileux selon les trois méthodes signalées. En outre, en l'absence de toute méthode standardidisée de quantification, on indique aussi la manière de quantifier les composants minéraux notamment en recourant à des facteurs correctifs. La méthode de quantification au départ des diffractogrammes est seulement suggérée et ne doit pas nécessairement appliquée par tous les laboratoires.

4.5.1. Confection de la poudre totale désorientée et analyse diffractométrique quantitative et semi-quantitative des minéraux argileux et non argileux

Le matériau, même fortement argileux, est broyé modérément à la main dans un mortier en agate ; il ne peut être pulvérisé car un broyage trop vigoureux (état de poudre ultrafine) peut entraîner une déstructuration et une délamination plus ou moins prononcées des feuillets des particules micrométriques argileuses, en favorisant le développement de défauts et en entraînant des structures "artificielles" susceptibles alors d'adsorber de l'eau (faux état de gonflement) en augmentant également la surface spécifique des minéraux. Par ailleurs, lors de la préparation des matériaux, on évitera également tout recours à l'usage prolongé des ultra-sons qui peuvent entraîner une perturbation granulométique ainsi qu'une déstructuration plus ou moins forte des minéraux argileux.

Après broyage modéré, le matériau argileux est placé dans une logette adéquate (support), en veillant à réaliser une bonne désorientation superficielle des grains ou particules de minéraux argileux : l'état désorienté est matérialisé dans le diffractogramme par l'occurrence de toutes les réflexions (hkl) des minéraux présents; leur absence et la présence des seules réflexions (001) indiquent une orientation des particules argileuses suite à un tassement des grains minéraux, en particulier les phyllosilicates et les particules argileuses. Il existe plusieurs "techniques" de désorientation: soit en piquotant délicatement à l'aide d'une fine aiguille la surface du dépôt plus ou moins tassé, ou en appuyant sur cette surface un papier buvard assez grossier qui vient se mouler sur le dépôt. Une désorientation parfaite des particules de la poudre globale n'est jamais atteinte quelle que soit la méthode de préparation. Cette caractéristique est due au fait que les petites particules argileuses ont tendance à se disposer à plat selon leur plan (a,b) orienté parallèlement au support.

Les réflexions (hk) de certains minéraux non argileux sont essentielles pour leur détermination qualitative et semi-quantitative: certaines réflexions (hk) sont, en effet diagnostiques de la composition d'une phase minérale particulière alors que les réflexions (001) qui subsistent ne le sont pas. Au plan qualitatif, à partir du diffractogramme de la poudre désorientée, on identifie les différents composants sur base de la réflexion la plus intense dont l'intensité intervient dans la quantification relative.

Au point de vue quantitatif, l'intensité des réflexions (hk) caractéristiques peut être corrigée par un facteur propre à chaque espèce minérale identifiée; ramenées à 100 par une simple règle de trois, ces intensités "pilotes" reflètent assez fidèlement l'abondance relative des différents composants minéraux, argileux et non argileux dans le matériau global. La réflexion (020), commune à tous les minéraux phyllosilicatés et argileux (sauf au chlorite) et son intensité propre dans le diffractogramme correspondent à la fraction argileuse globale.

Comme souligné plus haut, il n'existe aucune méthode universelle permettant de quantifier les différents composants minéraux, argileux et non argileux, dans une poudre désorientée. Celle pratiquée au LGA de l'ULg consiste à mesurer l'intensité caractéristique des minéraux identifiés et de la corriger par un facteur correctif spécifique:

- a) Le *quartz* est quantifié à partir de la mesure de l'intensité (i) de la réflexion (100) à 4,26Å, de préférence à la réflexion (101) à 3,3Å; celle-ci est commune et donc difficilement discriminable de la réflexion (003) de l'illite-mica en cas de mélange de quartz et d'illite-mica. L'intensité de la réflexion à 4,26Å est considérée comme étant équivalente à 35% de la réflexion à 3,3Â. Une simple règle de trois permet de fixer la contribution du quartz dans le matériau soit : i(4,26) X 100/35
- b) L'albite-oligoclase et l'orthose ou l'un des deux minéraux, sont identifiées à partir des réflexions à 3,18-3,19Å (plagioclases) et à 3,25Å (orthose). L'intensité des deux réflexions est multipliée ensuite par un facteur correctif égal à 1,9, en tenant compte du bruit de fond du diffractogramme ainsi que du "pied" de la réflexion voisine à 3,3Å (quartz et illitemica).
- c) Les carbonates sont identifiés grâce à leurs réflexions caractéristiques les plus importantes; à 3,03Å pour la calcite; à 2,74Å pour la magnésite; à 2,89Å pour la dolomite; à 2,90Å pour l'ankérite; à 2,79Å pour la sidérite; à 3,4Å pour l'aragonite (constituant de certains tests de fossiles calcaires). L'intensité de la réflexion est corrigée par un facteur 2.
- d) Le gypse est identifié par sa réflexion principale à 7,56Å, avec son intensité non corrigée.
- e) La goethite présente une réflexion vers 4,18Å, à intensité non corrigée.
- f) Le contenu total en minéraux argileux et phyllosilicates est obtenu par la mesure de l'intensité de la réflexion commune (020) vers 4,15Å, mesurée directement par-dessus le bruit de fond reconstitué. Cette intensité est multipliée par un facteur 20.

On totalise ensuite les résultats des multiplications (intensité X facteur correctif) pour les différents minéraux identifiés; par simple règle de trois, on établit ensuite leurs pourcentages respectifs dans le matériau. Les valeurs obtenues ne doivent pas être considérées comme absolues car la marge d'erreur peut atteindre 10% ou plus selon les minéraux.

4.5.2. Confection de la pâte orientée 16 microns et analyse diffractométrique quantitative et semi-quantitative des minéraux argileux

La technique de la pâte orientée est connue depuis des décennies mais elle a toujours été appliquée à la seule fraction argileuse inférieure à 2 microns (cette dernière étant obtenue préalablement par sédimentation et centrifugation en milieu d'eau distillée ou déminéralisée). La pâte orientée doit être homogène au point de vue granulométrique sur toute l'épaisseur du dépôt.

La méthode de sédimentation sur support de verre obtenue à partir d'une suspension mise à sécher a l'inconvénient de présenter parfois une certaine ségrégation granulométrique, et partant minéralogique, au sein même de la suspension lors du séchage: en effet, les minéraux aux dimensions les plus proches de 2 microns se sédimentent les premiers au sein du ménisque de suspension tandis que les minéraux de taille plus petite (cas des smectites) s'accumulent en dernier lieu à la fin de l'évaporation du ménisque et sont ainsi concentrés dans la partie la plus superficielle du dépôt.

La méthode des pâtes orientées est cependant plus délicate à appliquer en présence de "smectite" dont le séchage trop rapide et non contrôlé entraîne une désorientation des particules micrométriques ainsi que le développement de très fines fissures de dessication; cette méthode requiert donc un certain "savoir faire" et ne permet surtout pas la confection rapide de grandes séries d'échantillons.

La méthode d'investigation DRX, dénommée ici "méthode de la sédimentation-pâte -(16 microns) orientée globale", qui est préconisée pour caractériser les matériaux argileux des CET, s'adresse globalement à toutes les fractions granulométriques confondues y compris la fraction "classique" inférieure à 2 microns. Cette méthode ne remplace cependant pas celle des poudres désorientées (laquelle doit être maintenue pour la caractérisation) ni celle des agrégats orientés 2 microns (dont les échantillons peuvent être analysés, éventuellement en complément, afin de préciser certaines caractéristiques de la fraction argileuse gonflante). La méthode "pâte sédimentée-orientée globale" concerne la préparation et l'investigation par DRX (avec l'application au minimum de trois tests: N, EG et 500) d'un dépôt argileux orienté mais contenant toutes les fractions granulométriques et donc tous les minéraux argileux et phyllosilicates présents dans le matériau argileux global.

Le mode opératoire est le suivant : Après broyage léger du matériau plus ou moins sec au mortier d'agate, on tamise le matériau sous eau déminéralisée en le faisant passer à travers les mailles d'un tamis de 16 microns ou de 250 microns ; on recueille la partie filtrée dans un bécher de 250 ml. On laisse décanter ou on centrifuge (15min. à 5.000 t/min). On recueille le matériau humide à l'aide d'une spatule, en y additionnant quelque 20 ml d'eau déminéralisée si nécessaire. On étale le matériau dans la logette du support en repassant avec la spatule (ou un film négatif) de manière à lisser le dépôt; une autre manière est de verser le dépôt concentré par centrifugation, directement dans la logette du support sans étalement et sans sédimentation différentielle: le séchage du matériau préserve toutes les réflexions (hk0) tout en renforçant les réflexions (001) des composants argileux. Une fois le dépôt séché (séchage à contrôler de manière à ne pas favoriser la formation de fines fissures de dessiccation), on procède à l'analyse DRX en soumettant la préparation successivement sous trois états: normal, glycolé et chauffé. On quantifie de manière interne les proportions relatives des minéraux argileux dans cette préparation;

cette ventilation est ensuite reportée sur la réflexion (020) présente dans le diffracgtogramme soit en se rapportant au diffractogramme de la poudre totale désorientée.

En fonction des résultats des trois tests, on peut généralement identifier les différents minéraux, argileux et non argileux. Comme signalé plus haut, on quantifie leur participation respective dans le mélange mais de manière relative et non absolue en se référant à la valeur des intensités des réflexions principales (001), le total étant de 100%.:

- a)- l'illite (mica) est quantifiée par l'intensité de sa réflexion principale à 10Å sur diffractogramme de l'échantillon glycolé (EG);
- b) La différenciation entre kaolinite et chlorite est basée sur l'occurrence dans le diffractogramme d'une double réflexion à 3,5Å (3,56Å = réflexion (002) de la kaolinite et 3,53Å= réflexion (004) de la chlorite); l'occurrence de chlorite peut être en outre confirmée par la réflexion (003) à 4,7Å dans le diffractogramme EG; par contre, celle de la kaolinite peut rester douteuse car la réflexion commune à 7Å (*cf.* (001) de la kaolinite et (002) de la chlorite) ne présente pas de doublet mais, dans certains cas favorables, une petite rupture de pente sur le flanc interne de la réflexion. En cas de doute à propos de la présence simultanée de kaolinite et de chlorite, on peut (doit) procéder à une attaque à l'HCl (4N à ébullition) sur une autre fraction du matériau, avant de refaire une nouvelle pâte orientée globale. Une telle attaque dissout les chlorites Fe-Mg (mais non alumineuses) mais n'affecte pas la kaolinite. S'il subsiste alors sur le diffractogramme du matériau attaqué des réflexions à 7 et à 3,5Å, on est assuré de la présence de kaolinite en mélange avec la chlorite.

Le problème pratique concerne l'absence de standard interne : en effectuant l'attaque acide, on ne dispose pas de moyen direct pour quantifier la kaolinite d'autant plus que cette attaque modifie aussi le contenu en interstratifiés et smectites; ces dernières voient leur réflexion principale se tasser sur celle de l'illite, en augmentant ainsi l'intensité de la réflexion commune à 10Å. Sur le diffractogramme EG, la kaolinite peut être quantifiée en première approximation par l'intensité de la réflexion à 7Å en tenant compte de la réduction de cette intensité entre le diffractogramme EG et HCl si l'on traite le même volume de matériau à la fois dans l'essai en routine N-EG-500 et dans celui qui est soumis à l'attaque acide.

c) La chlorite est théoriquement détectée par sa réflexion à 14Å si elle est présente dans le diffractogramme N et/ou EG et surtout pas sa réflexion (004) à 4,7Å (diffractogramme EG). En aucune manière l'intensité de cette réflexion ne peut être mesurée sur le diffractogramme 500 car soit la chlorite est dégradée (vermiculitisée) et l'intensité de la réflexion à 14Å est alors fortement diminuée tout en développant parallèlement et éventuellement une bande de diffraction entre 14 et 10Å, soit la réflexion à 14Å correspond à une vermiculite dont la réflexion (001) se tasse complètement à 10Å au chauffage, soit enfin il peut s'agir d'une chlorite ferrifère intacte (non dégradée) dont l'intensité de la réflexion à 14Å peut être accrue après chauffage d'un facteur 2 à 4 (ce qui fausse la sensiblement la quantification interne du minéral dans le mélange si l'on se contente de "quantifier" la participation de la chlorite sur la base de l'intensité de la réflexion à 14A après chauffage).

Par ailleurs, dans de nombreux cas, la réflexion à 14A du complexe chloritique peut être masquée, sur les diffractogrammes N et EG, par les réflexions (ou bandes de diffraction)

relatives à d'autres composants argileux, en particulier par des interstratifiés de type illitesmectite. Il n'est pas toujours aisé de mesurer cette intensité en conditions N ou EG. Il existe cependant un moyen de mesurer l'intensité réelle de la réflexion (001) à 14Å de la chlorite en recourant au test au Li (bien que ce test "serve" surtout à identifier la phase smectitique associée). La saturation au LiCl suivie d'un chauffage à 300°C a pour effet de tasser à 10A toutes les réflexions comprises entre 10 et 15Å appartenant aux complexes smectitiques; dès lors la réflexion à 14Å de la chlorite, non sensible à cette saturation, est parfaitement dégagée dans le diffractogramme, ce qui en permet la mesure de l'intensité réelle avant toute modification induite par le chauffage.

d) le composant smectitique est diagnostiqué par la présence, dans le diffractogramme EG, d'une réflexion (001) développée aux environs de 17Å. Cependant, toute réflexion à 17Å (EG) n'implique pas qu'il s'agisse réellement de smectite (montmorillonite, beidellite, nontronite,...) mais souvent, dans le cas de sédiments et de sols, d'un interstratifié illite-smectite dont le taux de gonflement peut être compris entre 35 et 50% en moyenne et n'atteint pas 100%. Ce gonflement limité est important à mettre en évidence (à l'aide d'abaques) car il induit des effets géomécaniques non négligeables sur les sites étudiés.

Pour estimer le taux de gonflement d'une smectite, on effectue la mesure d'un rapport hauteur (intensité du pic, p) à 17A par rapport à la "vallée" (v) qui sépare la réflexion du bruit de fond remontant vers les petits angles. Ce rapport v/p permet une estimation de la "cristallinité" ou de l'ordre-désordre au sein de la population de cristallites du composant gonflant.

La quantification relative des composants smectitiques dans le mélange argileux est obtenue, non pas en mesurant l'intensité de la réflexion à 17Å (sur diffractogramme de l'échantillon glycolé) comme cela se pratique généralement, mais sur le diffractogramme de l'échantillon chauffé à 500°C, par différence d'intensité de la réflexion à 10Å commune de l'illite et de la smectite sur diffractogramme de la pâte chauffée à 500°C et l'intensité à 10Å de l'illite sur diffractogramme de l'essai glycolé. En effet, la réflexion à 17Å peut être très mal structurée et se présenter sous forme de bande de diffraction ou de réflexions très évasées dont il est difficile alors de mesurer l'intensité réelle en raison de la morphologie évasée de la réflexion à 17Å (par exemple, présence d'une bande de diffraction s'étalant entre 14 et 17-20Å et remontant vers le début du diffractogramme). La mesure d'intensité d'une telle "réflexion" vers 17Å surestime la part prise réellement par le composant smectitique. Par ailleurs, sachant que les smectites se "tassent" à 10Å après chauffage, la différence entre l'intensité totale de la réflexion commune à 10Å après chauffage à 500°C et celle à 10Å de l'illite dans le diffractogramme EG fournit parfaitement la contribution relative de la smectite. En d'autres termes, la contribution du composant smectitique (minéral ou interstratifié illite-smectite) = l'intensité de la réflexion à 10A (commune à l'illite sur diffractogramme EG et à la "smectite" tassée par chauffage) moins l'intensité de la réflexion à 10A de l'illite (sur diffractogramme EG).

e) Les différents interstratifiés (illite-smectite, illite-chlorite, illite-vermiculite, chlorite-vermiculite ou chlorite-smectite) peuvent être identifiés et quantifiés en fonction de la position des "réflexions" principales (se présentant essentiellement sous forme de bande de diffraction entre 10 et 17Å selon les espèces considérées), en se référant au comportement de telles bandes de diffraction par comparaison de leurs caractéristiques sur les diffractogrammes des essais normal, glycol et chauffage. On mesure les intensités des

bandes de diffraction à mi-largeur sur certains diffractogrammes en fonction de la nature des interstratifiés.

- f) La contribution des interstratifiés illite-chlorite, illite-vermiculite, illite-smectite et chlorite-smectite, est quantifiée par la mesure de la hauteur de la bande de diffraction sur diffractogrammes EG.
- g) chlorite-vermiculite: la contribution est quantifiée en comparant l'intensité de la réflexion à 14Å sur diffractogrammes N/EG (ou Li300) et à 500° (on mesure en réalité la différence d'intensité des réflexions).

Il n'y pas de règles de quantification adaptées par tous les laboratoires (par exemple, avec correction variable des intensités des réflexions (001) selon les différents minéraux, en recourant à un facteur correctif différent selon l'espèce minérale. En sorte que l'on pourrait se contenter de mesurer simplement l'intensité de ces réflexions et, par règle de trois, redistribuer les quantités relatives au sein de la fraction minérale argileuse ramenée à 100. Il ne s'agira pas de toute manière de véritables pourcentages absolus non plus, surtout en cas de mélanges de plusieurs minéraux.

On peut toutefois appliquer un facteur correctif aux différentes intensités mesurées et intéressant les minéraux argileux identifiés:

- a) illite: l'intensité de la réflexion à 10Å est comptée comme unité;
- **b**) chlorite: l'intensité de la réflexion à 14Å (soit sur diffractogramme EG si cette réflexion est bien isolée, soit sur essai Li300) est corrigée par un facteur = 1,5;
- c) vermiculite : ce minéral provient généralement de la dégradation du chlorite mais aussi de celle de l'illite; sa contribution est mesurée par la différence d'intensité de ce pic dans le diffractogramme EG ou Li300 (en s'aidant comme standard interne de la réflexion à 7Å stable) avec l'intensité de la réflexion à 14Å après chauffage. Cette différence d'intensité est corrigée également par un facteur de 1,5;
- d) smectite: différence d'intensité de la réflexion à 10Å (diffractogramme de l'échantillon chauffé à 500°C) et de l'intensité de la réflexion à 10Å de l'illite (diffractogramme EG). Cette valeur d'intensité n'est pas corrigée;
- e) interstratifié illite-vermiculite (10-14v) et illite-chlorite (10-14c): produit de la hauteur de la bande de diffraction vers 12Å mesurée à mi-largeur, multipliée par la largeur à mi-hauteur et ensuite par le facteur correctif de 2:
- f) kaolinite: soit sur base de l'existence d'un doublet à 3,5Å, on évalue la proportion relative de la chlorite et de la kaolinite en fonction du rapport (3,56Å de la kaolinite/3,53Å de la chlorite) et l'on rapporte cette valeur du rapport sur la réflexion commune à 7Å, soit on essaie de détecter la petite rupture de pente sur la réflexion à 7Å, cette rupture étant située du côté des petits angles correspond à la réflexion à 7,15Å de la kaolinite (la chlorite ayant sa réflexion vers 7,05Å). L'intensité mesurée est corrigé en la multipliant par 0,5 dans le cas de kaolinite bien cristallisée (réflexion à 7Å fine et symétrique) soit par 0,7 dans le cas de kaolinite mal cristallisée (réflexion à 7Å élargie dans sa partie basale ou présentant une asymétrie vers les petits angles).

g) interstratifié chlorite-vermiculite : comme dans le cas de la vermiculite, on mesure la différence d'intensité de la réflexion à 14Å avant chauffage (sur diffractogrammes EG ou Li300- dans ce dernier cas, on se sert de la réflexion à 7Å comme standard interne en comparant les deux diffractogrammes) et de la réflexion résiduelle à 14Å après chauffage. L'occurrence de cet interstratifié est matérialisée par une bande de diffraction s'étalant entre 10 et 14Å dans l'essai chauffé. On corrige sa participation dans le mélange en multipliant par un facteur de 1,5 la différence d'intensité entre la réflexion à 14Å dans l'essai EG ou Li300 avec l'intensité de la réflexion résiduelle à 14Å (essai chauffé). Il faut toutefois prendre garde à ne pas confondre la bande 10-14Å d'un interstratifié chlorite-vermiculite (14c-14v) avec celle d'un interstratifié illite-chlorite (10-14c) lequel est stable au chauffage; toutefois, en cas d'occurrence simultanée de ces deux interstratifiés, on peut apercevoir une augmentation sensible de la hauteur de cette bande en la comparant dans l'essai glycolé et dans celui de l'échantillon chauffé.

h) interstratifiés illite-vermiculite (10-14v) et illite-chlorite (10-14c): leur contribution est définie par la hauteur de la bande de diffraction "(002)" dans le seul essai glycolé. Outre la multiplication de cette intensité par la largeur de la bande de diffraction (mesurée à mihauteur), on multiplie la valeur de ce produit pas le facteur correctif de 2.

On peut ultérieurement répartir la proportion relative des minéraux argileux tels quantifiés dans la pâte orientée, en rapportant les pourcentages relatifs corrigés sur l'intensité de la réflexion commune (020) mesurée dans le diffractogramme de poudre désorientée.

Si l'on complète l'analyse DRX du matériau global par celle de la fraction argileuse, il va de soi que tant le repérage des minéraux argileux et leur quantification interne sont ceux indiqués dans le cas du matériau global.

4.5.3. Confection de l'agrégat orienté (fraction inférieure à 2 microns) et analyse diffractométrique quantitative (analyse complémentaire éventuelle)

En vue de préciser la composition de certains minéraux argileux, on peut procéder à l'analyse des minéraux argileux concentrés cette fois dans la fraction inférieure à 2 microns, avec l'enregistrement des diffractgrammes N, EG et 500°C. Dans ce cas, on recourt à la confection des agrégats orientés selon la méthode de sédimentation sur lame de verre plutôt qu'à celle d'une pâte orientée. Les raisons sont multiples mais elles concernent surtout la rapidité de confection, le fait que l'on échappe à un séchage trop rapide (qui désoriente les particules et occasionne des fissures dans la pâte orientée) et la possibilité de réaliser un grand nombre de préparations en un minimum de temps. On a vu que la méthode de sédimentation sur lame de verre peut entraîner une ségrégation granulométrique au sein du ménisque de la suspension argileuse lors de son séchage dans l'atmosphère du laboratoire, mais cet inconvénient ne constitue pas un frein réel pour l'analyse qualitative et semi-quantitative des assemblages argileux.

Pour confectionner l'agrégat orienté selon la méthode de sédimentation sur support en verre, la fraction argileuse est extraite en milieu d'eau déminéralisée par centrifugations et sédimentations différentielles successives. Les seuls pré-traitements qui pourraient être appliqués concernent la dissolution des carbonates (par attaque à l'HCl 0,10N à froid) et l'élimination éventuelle des sulfates (gypse, anhydrite: par simple lessivage du matériau à l'eau chaude); la présence de ces minéraux entraîne, en effet, la floculation de la

suspension argileuse. On ne peut envisager l'application de pré-traitements classiques pour se débarrasser des allophanes et/ou des hydroxydes, les traitements habituellement préconisés dans la littérature induisant des modifications structurales très sensibles au niveau des minéraux argileux labiles (notamment les interstratifiés) ainsi que des modifications minéralogiques (par exemple, une saturation au Mg peut reconstituer de la chlorite au départ d'un interstratifié chlorite-vermiculite de l'échantillon naturel ou bien la substitution de beidellite par de la montmorillonite et le blocage de tout gonflement de certaines beidellites par saturation préalable au MgCl2,...).

La technique concentre les minéraux argileux tandis que les autres composants (quartz, feldspaths) sont éliminés ou fortement réduits en % relatifs par rapport à leur contribution dans la poudre totale désorientée ou dans la pâte globale orientée.

Les agrégats orientés obtenus par sédimentation sur lame de verre sont soumis en séquence au diffractomètre selon trois tests classiques: à l'état séché (dit normal, N); après solvatation aux vapeurs d'éthylène glycol (12h, dans une atmosphère de vapeurs obtenue après vide préalable, EG) et après chauffage à 500°C. En fonction des résultats analytiques préliminaires obtenus par le dépouillement des trois diffractogrammes, il est parfois nécessaire de prévoir certains post-traitements spécifiques destinés à préciser la nature de certains composants argileux et pour faciliter la quantification interne (par exemple la mise en évidence de la contribution réelle de la chlorite dans le diffractogramme du test Li-300 sur base de l'intensité intacte du pic à 14Å dans ce dernier essai).

4.6 Appareillage et méthode : Analyses minéralogiques par diffraction des rayons X

La composition minéralogique du sédiment total et la composition de la fraction argileuse (i.e., inférieure à 2 microns) ont été analysées par diffraction des rayons X, respectivement sur une poudre non orientée ou un agrégat argileux. Les estimations qualitatives et semi-quantitatives sont basées sur la mesure de l'intensité de pics caractéristiques mesurés sur des diagrammes de rayons X. l'appareil utilisé est de type D8-Advance Bruker équipé d'un tube à rayons X avec anticathode de Cu.



Figure 39: Diffractomètre Bruker D8 Advance

4.6.1 Minéralogie totale

Pour chaque échantillon, une aliquote de l'ordre de 1g de sédiment total est prélevée. L'échantillon est ensuite broyé manuellement au mortier à agate et tamisé à sec à 250 microns. La poudre est placée dans un porte échantillon par simple pression afin de limiter toute orientation préférentielle des minéraux selon la méthode de Moore et Reynolds (1989). Le spectre de diffraction est enregistré pour des angles de diffraction compris entre 2 à 30°20. L'estimation semi-quantitative est obtenue en appliquant à l'intensité mesurée un facteur correctif multiplicatif déterminé par Cook et al. (1975) et modifié par Boski et al. (1998). Les facteurs correctifs suivants ont été appliqués:

Les intensités corrigées sont sommées et le pourcentage relatif de chaque minéral est calculé par rapport à une somme ramenée à 100%.

4.6.2 Fraction argileuse

La préparation des échantillons consiste à orienter les particules argileuses afin de renforcer leur réflexion principale. Une fraction de l'échantillon brut est broyée manuellement, mise en suspension dans l'eau distillée. Selon la composition minéralogique établie préalablement, la suspension est lavée à l'eau chaude pour éliminer le gypse et ensuite décarbonatée (HCl 1N). Après rinçage, la suspension est tamisée à 63 microns. Ensuite la fraction argileuse (i.e., <2µm), prélevée par pipette après un temps de sédimentation calculé selon la loi de Stokes, est déposée sur une lamelle de verre (méthode de Moore and Reynolds, 1989). Après séchage à l'air, l'agrégat orienté, ainsi obtenu est soumis à la diffraction des rayons X (D8-Advance, Bruker). Cette analyse donne l'énergie du faisceau diffracté par les particules minérales selon l'angle de balayage (de 2 à 30°2θ). Dans un mélange argileux naturel, le spectre de diffraction enregistre différents pics correspondants aux réflexions des différentes espèces argileuses présentes, selon la loi de Bragg ($n\lambda = 2d\sin\theta$). Une même famille argileuse donnant plusieurs pics, il est nécessaire d'enregistrer en plus du spectre dans les conditions normales, un spectre après solvation (Ethylène-Glycol, 24h) et un spectre après chauffage (500°C, 4h). La comparaison des 3 spectres obtenus sur la même préparation argileuse permet d'identifier les minéraux argileux. L'illite se caractérise par une réflexion à 10 Å, elle est insensible à la solvatation ou au chauffage. La chlorite présente un pic à 14Å, inchangé sur les 3spectres. Les minéraux de la famille des smectites sont sensibles à la solvatation, on observe une expansion de la réflexion à 15Å vers 17Å. Après chauffage les smectites se rétractent à 10Å. La kaolinite présente une réflexion à 7Å, réflexion qui disparaît après chauffage (Thorez, 1976); Moore and Reynolds, 1989). La playgorskite est caractérisée par une réflexion à 10.5Å qui se rabat à 9.3Å après chauffage.

L'estimation semi-quantitative (±5 à 10%, Biscaye, 1965) des principales espèces argileuses est basée sur la mesure de la hauteur des réflexions caractéristiques de chaque espèce argileuse, généralement mesurées sur le spectre après solvatation. Les intensités

mesurées sont corrigées par un facteur correctif pour tenir compte de la diminution de l'énergie reçue par le détecteur en fonction de l'angle de balayage croissant et de l'état de cristallinité des minéraux. Les intensités sont divisées par un facteur correctif établi empiriquement au laboratoire (1 pour illite et smectites, 2.5 pour chlorite et interstratifiés irréguliers illite-chlorite (10-14c), 1.4 pour kaolinite – J. Thorez, comm. Pers.) et les valeurs sont sommées à 100% (méthode détaillée dans Fagel et al., 2003).

4.6.3 Préparation pour analyse minéralogique par diffraction des rayons X

4.6.3.1 Analyse de la minéralogie totale : préparation d'une poudre

- Prélever une aliquote de l'ordre de 1g de sédiment total et sécher à 40°C à l'étuve
- Broyer manuellement l'échantillon au mortier à agate
- Tamiser à sec à 250 microns (tamis métallique)
- Placer le porte échantillon à l'envers sur une lame de verre dépolie nettoyée, remplir le porte-échantillon à l'aide d'une spatule, compacter régulièrement et délicatement la poudre afin de limiter toute orientation préférentielle des minéraux, poser le disque de plexiglas en vérifiant qu'il s'adapte parfaitement (même niveau) au porte échantillon, fixer le support arrière noir, retourner la préparation, indiquer le numéro de l'échantillon au crayon sur le support en plexiglas
- Passer les échantillons au diffractomètre (D8-Advance, Bruker)





Figure 40: Disque de plexiglas et accessoires

Figure 41: Tamis métallique

4.6.3.2 Analyse de la fraction argileuse < 2 microns : préparation d'un agrégat orienté

<u>Principe</u>: la préparation des échantillons consiste à orienter les particules argileuses afin de renforcer leur réflexion principale.

- Prélever une aliquote de l'échantillon brut (qlq cc) et sécher à l'étuve à 40°C
- Broyer manuellement l'échantillon (mortier en agate) ou non
- Mettre une suspension dans l'eau déminéralisée
- Tamiser à 63 microns (tamis métallique et/ou nylon)

Note : choisir la maille du tamis selon la matrice sédimentaire (tamisage à 30 microns si diatomées).

- La fraction < 63 µm est récupérée dans un erlenmeyer de 500 ml
- Le refus de tamis est séché à l'étuve et stocké





Figure 42: Préparation d'un agrégat orienté

- a) <u>Si présence de carbonates</u>:
 - Décarbonater l'échantillon en ajoutant HCl dilué (0.1 N). Travailler sous hotte et sous légère agitation magnétique (ajouter un barreau aimenté)
 - Vérifier le Ph de la solution (papier Ph) et ajouter des petites quantités d'acide tant que la solution n'est pas acide (i.e., réaction incomplète)
 - Lorsque la solution devient acide, attendre et vérifier à nouveau que la réaction soit complète
 - Retirer l'erlenmeyer de la plaque d'agitation magnétique, retirer le barreau aimanté, ajouter de l'eau déminéralisée et laisser décanter la solution
 - Vider le surnageant clair
 - Centrifuger au moins deux fois afin de rincer correctement l'échantillon et utiliser de l'eau déminéralisée

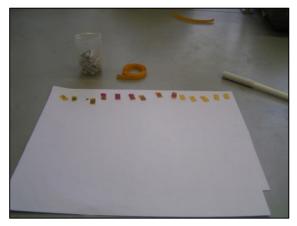




Figure 43: Vérification du pH de la solution

Figure 44: Centrifugeuse

b) <u>Si présence de sulfates</u>: remplir l'erlenmeyer d'eau chaude (le gypse est soluble dans l'eau à partir de 60°C), laisser décanter, vider le surnageant transparent, rincer au moins trois fois. Centrifuger au moins deux fois pour rincer correctement l'échantillon et utiliser de l'eau déminéralisée.



Figure 45: Présence de sulfates

4.6.3.3 Résultats des essais minéralogiques de rayons X (échantillon total):

L'analyse des différents échantillons montre que l'argile totale est composée de quartz, de calcite, de feldspaths et essentiellement de kaolinite et illite.

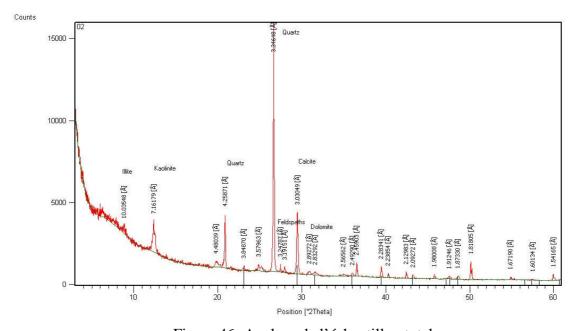


Figure 46: Analyse de l'échantillon total

Un nombre de onze échantillons représentatifs des formations traversées par ces sondages ont subi des analyses minéralogiques de rayons X afin de déterminer la composition du sol ainsi que les minéraux argileux présents,

SONDAGE Nº1:

Profondeur [8.80 – 9.20m] : Argile marneuse, échantillon (**code 9**)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.8	20	64.07
d=3.34Å	Quartz	7.7	1	30.83
d=3.02Å	Calcite	0.5	1.65	3.28
d=3.46-3.52Å	Anhydrite	0.5	0.9	1.80

Profondeur [10.80 – 11.20m]: Argile marneuse, échantillon (code 8);

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.8	20	52.63
d=3.34Å	Quartz	9.2	1	30.26
d=3.02Å	Calcite	2.1	1.65	11.38
d=3.21-3.26Å	Feldspaths-K	0.3	4.3	4.24
d=3.46-3.52Å	Anhydrite	0.5	0.9	1.48

Profondeur [14.00 – 14.45m] : Argile marneuse, échantillon (**code 10**)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.8	20	62.13
d=3.34Å	Quartz	7.2	1	27.96
d=3.02Å	Calcite	0.6	1.65	3.24
d=3.21-3.26Å	Feldspaths-K	0.3	4.3	5.0
d=3.46-3.52Å	Anhydrite	0.3	0.9	1.05

Tab. 13 : Résultats d'analyse par rayons X de l'argile totale SC 1 du site CW 52

4.6.3.4 Résultats des essais minéralogiques de rayons X (fraction argileuse):

L'analyse aux rayons X de la fraction argileuse, des différents échantillons de ce site, a montré qu'il s'agit de la kaolinite en très forte proportion, tandis que la smectite ne représente que moins de 5% de la composition de la fraction argileuse. La kaolinite est stable vis-à-vis du gonflement; mais la smectite est très sensible au phénomène de retrait gonflement, surtout en zone semi-aride, ce qui peut se manifester par des tassements différentiels des fondations.

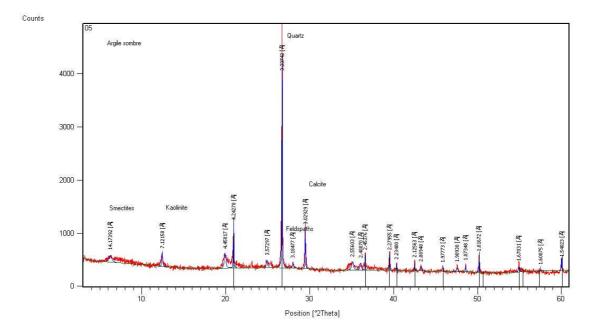


Figure 47: Échantillon 5 : Argile Sombre

4000

4000

Argile bariolée plastique

5000

Calche

Calche

Figure 47: Échantillon 5 : Argile Sombre

1000

Figure 47: Échantillon 5 : Argile Sombre

1000

Figure 47: Échantillon 5 : Argile Sombre

Figure 48: Échantillon 6 : **Argile bariolée**

La fraction argileuse est analysée à partir de lames orientées normales, glycolée pendant 12 heures en tension de vapeur puis chauffées à 490°C pendant 4 heures. Les proportions sont estimées à partir de l'aire des pics.

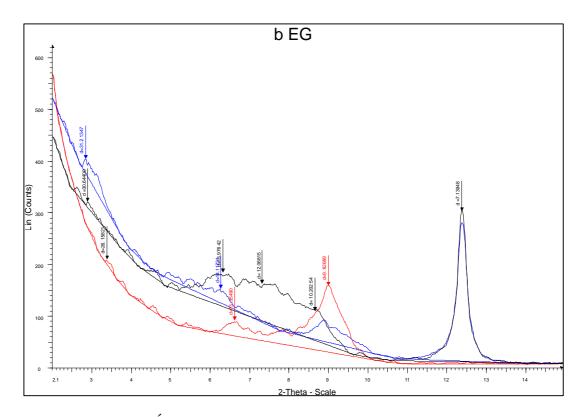


Figure 49: Échantillon 2 : Argile marneuse Sondage, RN79 Mila

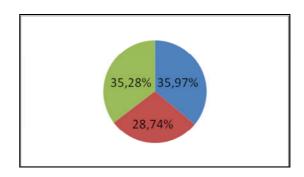
Après avoir éliminé les carbonates de calcium et sulfates, l'analyse de la fraction argileuse montre le pic de Kaolinite, illite ainsi que des interstratifiés gonflants et qu'à l'essai glycolé apparaissent clairement dans la première partie de diffractogramme.

Minéraux de la fraction argileuse CW52

SONDAGE Nº1

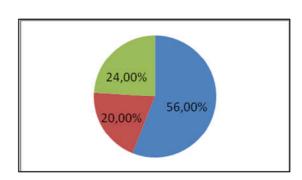
Code 9

kaolinite	35,97%
Vermiculite	28,74%
V-Cg	35,28%



Code 8

kaolinite	56,00%
Vermiculite	20,00%
C-V	24,00%



Code 10

kaolinite	32,29%
Vermiculite	30,09%
V-Cg	37,61%

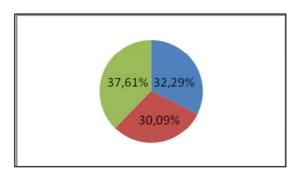


Figure 50: Minéraux de la fraction argileuse

4.7 MECANISME DE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES

L'objectif de notre recherche consiste en premier lieu à prendre en considération la composante des sols fins qui constitue les formations géologiques argileuses et/ou marneuses, affleurantes à sub-affleurantes. Dans cette approche géologique, on considère que celles-ci constituent les sols argileux.

À l'échelle microscopique, les minéraux argileux se caractérisent par une structure minéralogique en feuillets. Ceux-ci sont constitués d'un assemblage de silicates (SiO₂) et d'aluminates (Al₂O₃) entre lesquels viennent s'interposer des molécules d'eau. La majorité des minéraux argileux appartient à la famille des phyllosilicates 2:1 (deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique). La structure des assemblages cristallins est variable selon le type d'argile. Certains d'entre eux, telle que la montmorillonite, présentent des liaisons faibles entre feuillets, ce qui permet l'acquisition ou le départ de molécules d'eau.

L'hydratation des cations situés à la surface des feuillets provoque leur élargissement, ce qui se traduit par une augmentation du volume du minéral. C'est le phénomène de gonflement intracristallin ou interfoliaire. Le gonflement est lié au phénomène d'adsorption d'eau sur les sites hydrophiles de l'argile.

Ce processus est réversible. Un départ d'eau entraîne une diminution du volume du minéral, mais la liaison entre l'eau et les feuillets est forte. C'est le phénomène de retrait. Les phénomènes de retrait-gonflement s'expriment préférentiellement dans les minéraux argileux appartenant au groupe des smectites (montmorillonite, beidellite, nontronite, saponite, hectorite, sauconite) et dans une moindre mesure au groupe des interstratifiés (alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes ; par exemple illite – montmorillonite).

À l'échelle macroscopique, ces micro-agrégats de feuillets s'organisent en assemblages plus ou moins anisotropes et cohérents, en fonction de la forme des particules élémentaires qui les composent, et en fonction de la force des liaisons entre particules. Ces dernières sont assurées par des molécules d'eau intercalées. Ce mode d'assemblage, qui définit la texture du « sol argileux » dépend de la nature minéralogique des argiles, du mode de sédimentation et de l'état de consolidation du matériau. En particulier, une argile vasarde ne présentera pas la même texture – et donc pas la même cohésion – qu'une argile surconsolidée, par exemple à la suite d'un enfouissement à grande profondeur.

À cette échelle, la variation de teneur en eau dans le sol se traduit également par des variations de volume du matériau. On parle alors de gonflement interparticulaire. Ce phénomène affecte toutes les argiles, mais son amplitude est nettement plus faible que le gonflement interfoliaire (qui n'affecte que certaines argiles).

Les sols argileux se caractérisent donc par une grande influence de la teneur en eau sur leur comportement mécanique. En géotechnique, on identifie d'ailleurs les différents types de sols argileux sur la base de ce critère. Pour cela on détermine les teneurs en eau (dites limites d'Atterberg) à partir desquelles le comportement du matériau se modifie.

Atterberg, puis par la suite Casagrande, ont défini de façon conventionnelle, à partir de la teneur en eau, les limites de divers états de consistance d'un sol donné :

- la **limite de liquidité WL** sépare l'état liquide de l'état solide ; elle correspond à la teneur en eau à partir de laquelle l'argile commence à s'écouler sous son poids propre ;
- la **limite de plasticité WP** sépare l'état plastique de l'état solide (avec retrait) ; elle correspond à la teneur en eau en deçà de laquelle l'argile ne peut plus se déformer sans microfissuration.

L'étendue du domaine plastique compris en ces deux valeurs est dénommée indice de plasticité : $\mathbf{IP} = \mathbf{WL} - \mathbf{WP}$). Elle représente l'aptitude de l'argile à acquérir de l'eau.

- la **limite de retrait WR** : lorsque la teneur en eau diminue en dessous de WP, le volume de sol argileux se réduit progressivement, mais le matériau reste saturé en eau jusqu'à une valeur dite limite de retrait qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait.

À partir de ce stade, si la dessiccation se poursuit, elle se traduit par une fissuration du matériau. En cas de réhydratation de l'argile, l'eau pourra circuler rapidement dans ces fissures. Au-delà de WR, l'arrivée d'eau s'accompagnera d'une augmentation de volume, proportionnelle au volume d'eau supplémentaire incorporé dans la structure.

Les limites d'Atterberg, qui sont des teneurs en eau particulières, s'expriment, comme la teneur en eau W, en %.

Les phénomènes de retrait (liés à une diminution de volume du matériau qui se traduit, verticalement par un tassement, et horizontalement par une fissuration), et de gonflement (liés à une augmentation de volume), sont donc essentiellement causés par des variations de teneur en eau. En réalité, cependant, le phénomène est aussi régi par des variations de l'état de contrainte, et plus précisément par l'apparition de pressions interstitielles négatives.

Dans le cas d'un sol saturé, la contrainte verticale totale, qui règne dans le sol à une profondeur donnée, est la somme de la pression interstitielle due à l'eau et d'une contrainte dite effective qui régit le comportement de la phase solide du sol (pression intergranulaire). La contrainte totale est constante puisque liée à la charge exercée par les terrains susjacents (augmentée éventuellement d'une surcharge due, par exemple, à la présence d'une construction en surface). L'apparition d'une pression interstitielle négative, appelée succion, se traduit donc par une augmentation de la contrainte effective (c'est-à-dire une consolidation du squelette granulaire) et une expulsion d'eau.

Un sol argileux situé au-dessus du niveau de la nappe, et qui est saturé, est ainsi soumis à une pression de succion qui lui permet d'aspirer l'eau de la nappe, par capillarité, et de maintenir son état de saturation. Cette pression de succion peut atteindre des valeurs très élevées à la surface du sol, surtout si celle-ci est soumise à une évaporation intense.

4.7.1Résultats des différents sites étudiés :

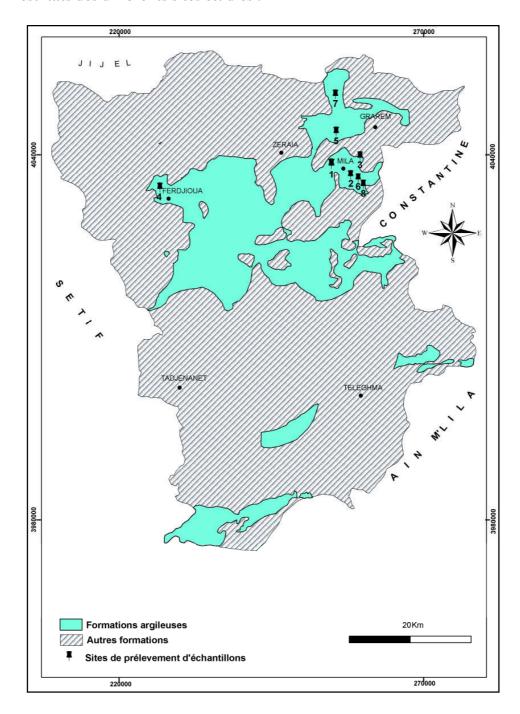


Fig. 51: Carte de délimitation des formations argileuses et marneuse et emplacement des sites de prélèvements

Sites de prélèvements :

(1) Site 185 Logements, Mila; (2) Route Nationale RN 79; (3) Site Kherrouba; (4) Site de Ferdjioua; (5) Site CW 52; (6) Site à l'entrée de la ville Azeba sur la RN 79; (7) Site glissement de Sibari sur la RN 27 (juste avant le barrage Ben Haroun); (8) Site à l'entrée de la ville El Malha sur la RN 79

4.7.1.1Site 185 logements

4.7.1.1.1 SITUATION DU SITE.

Le site en question est situé au chef lieu de la wilaya de Mila, il se localise dans un lotissement dit Benmahdoub au NW de la ville en allant vers Ferdjioua.

Le terrain se présente en versant avec une déclivité Nord Est.

De l'amont à l'aval, les valeurs de pentes sont :

13°: de la tête de talus au sondage n° 3A;

17°: du sondage n° 3A au sondage n° 2A;

14°: du sondage n° 2A au sondage n° 1A.

4.7.1.1.2 OCCUPATION DES SOLS.

Le terrain est occupé par (07) sept bâtiments En R+4, alignés parallèlement de l'amont à l'aval sur un même axe central.

4.7.1.1.3 CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE GEOTECHNIQUE

Trois sondages rotary en carottage continu, de profondeur d'investigation allant de 15m à 18m, ont été réalisés. Les sondages sont symbolisés par S3A; S2A; S1A. Le sondage S3A est équipé de tube piézométrique.

Les différents sondages montrent que la partie sommitale du terrain est constituée d'un remblai dont l'épaisseur varie de 0.30m à 2.50m.

Au-dessous, les sondages ont traversés un sous-sol relativement homogène, qui consiste en un agencement irrégulier de termes lithologiques cohérents, distincts par leurs teintes qui d'après leur faciès seraient attribués au miocène de la région de Mila.

La coupe type de terrain est la suivante :

- -Argile brune ; -Argile brune jaune ; -Argile brun verdâtre ; -Argile brun rougeâtre ;
- -Argile brune sombre.

Essais Physiques:

Les valeurs des caractéristiques physiques obtenues sont les suivantes :

- densité sèche γ _d	$1,66 < \gamma_d < 1,93$
- densité humide γ _h	$2.06 < \gamma_h < 2.17$
- teneur en eau naturelle ω %	15,18 < ω < 24,54 %
- degré de Saturation Sr %	87,27 < Sr < 100 %

Limites d'ATTERBERG:

- Limite de Liquidité W ₁ %	$48,00 < W_1 < 67,20$
- Limite de Plasticité W _p %	$25,56 < W_p < 31,00$
- Indice de Plasticité I _p	$21,00 < I_p < 41.94$

On remarque bien que l'indice de plasticité est élevé, ce qui traduit que le sol est sensible aux effets de gonflement par humidification (ou de retrait par dessication). Ces valeurs dénotent des sols moyennement plastiques à très plastiques.



Valeur du bleu de méthylène: VBS (norme NF P 94-068)

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractérise l'argilosité d'uns sol. Son application est récente.

Ce paramètre, noté VBS (valeur de bleu du sol), représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré; c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension du sol maintenu en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole.

La VBS traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour100g de sol.

Les résultats sur les différents échantillons montrent qu'on est en présence des sols limoneux à argileux ; la valeur du bleu est entre 3 et 6.

Essai de Compressibilité à l'œdomètre.

Pour l'évaluation des déformations sous les contraintes appliquées, nous avons réalisé des essais de compressibilité à l'œdomètre, qui ont montré que les sols en question sont :

- Surconsolidés Pc (bar): 3,00 < Pc < 3,30

- Moyennement compressibles à très compressibles C_c %: 15,6 < C_c < 27,8

- Sol Gonflant C_g % 7,20 < C_g < 12,10



4.7.1.2 R.N. 79 – MILA;

Sondage n° S-05		Intervalle d'échantillonnage	
		[6,50 à 7,00m]	[11,60 à 12,00m]
Teneur en eau nat	urelle ω%	22,1	19,76
Densité sèche : γ _d	(t/m^3)	1,95	1,76
Densité humide :		2,17	2,08
Degré de saturation	on : Sr %	100	90.9
Granulométrie	2mm	90	79
% de passant à	0.40mm	72	69
	0.08mm		
Limites	Liquidité : W ₁	40,7	65,0
d'Atterberg	Plasticité : I _P	21,2	37,5
Caractéristiques	P _c (bars)	2,200	4,00
Oedométriques	$C_{C}(\%)$	0.125	0,191
	C_g (%)	0,039	0,082
C' (bars)		0,64	0,49
φ' (°)		6°	10
P _g (bars)		0,62	0,66
Cisaillement	C (bars)	0,600	0,25
rectiligne φ (°)		4	8
Bleu de méthylène 0/400		3,77	4,06
Essais de Chimie Carbonates %		43,9	53,9
	Insolubles %	40,5	42.29
	Gypse %	Traces	Traces

Tab. 10 : Sondage N° 5 : Résultats d'analyse physico-mécanique et chimique des carottes Localisation : PK 0 + 200 – Mila.

4.7.1.3 Site CW 52; MILA;

Un troisième site a été étudié dans ce présent travail, il s'agit d'un site hors ville, mais exposé à des mouvements de terrain intenses ; le site se trouve en pente forte, trois sections touchées par un glissement sur le CW 52 du PK3+000 ; du PK 3+200 ; du PK 3+500 au PK 3+600 ; du PK 4+400 au PK 4+600. Ce terrain n'est plus en équilibre sous uniquement la charge de son propre poids. En plus des études faites pour déterminer les causes et le mécanisme de glissement, nous tenterons ici de mettre l'argile sous microscope, dont le but de trouver des indices de gonflement et de retrait.

4.7.1.3.1 Coordonnées Lambert des points de sondages

A l'aide d'un GPS « GARMIN » dont la réception se base sur le signal reçu de douze satellites, nous avons prélevé les coordonnées des points de sondages en coordonnées géographiques qui sont converties en coordonnées Lambert:

```
    Sondage, SC1: {X=814.589Km; Y=359.196Km; Z=464m},
    SC2: {X=814.584Km; Y=359.202Km; Z=464m},
    SC3: {X=814.771Km; Y=359.082Km; Z=445m},
```

ightharpoonup SC4: {X=814.752Km; Y=359.082Km; Z=449m},

SC5: {X=815.280Km; Y=359.282Km; Z=413m},
 SC6: {X=815.270Km; Y=359.282Km; Z=413m},

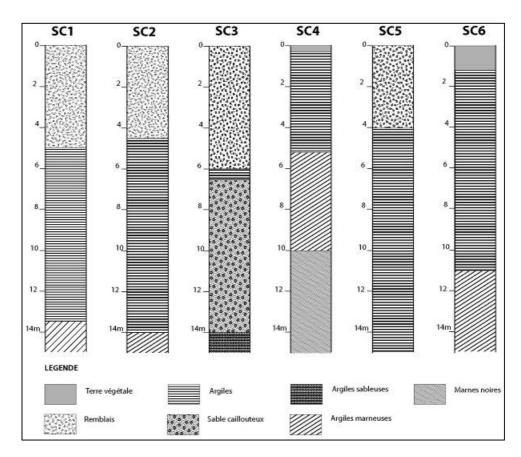


Fig. 52: Sondages réalisés par DTP/MILA

Six sondages carottés de 15 mètres de profondeur avec prélèvement d'échantillons en vue des essais géotechniques ont été réalisés. (DTP/MILA, dossier n° 100/DRC/RM/43/ES/68/08)

Les sondages carottés montrent qu'il s'agit de haut en bas, d'une couche de remblais, ensuite une couche argileuse intermédiaire qui repose sur une argile marneuse épaisse. Le sondage SC3 traverse une couche de galets et cailloux de puissance 7,5m.

4.7.1.3.2 Essais d'identification

SC	Profondeur	Densité	Densité	Teneur	Degré de	Limit	es d'Atte	rberg
N°	(m)	sèche	humide	en eau	saturation	Wl %	Wp %	Ip %
		$\gamma_{\rm d}$	γ_h	naturelle	Sr (%)			
		(t/m^3)	(t/m^3)	ω (%)				
01	8.80-9.20	1.58	1.97	25.06	97.46	/	/	/
	10.80-11.20	1.53	1.94	26.90	97.18	68.64	27.59	41.05
	14.00-14.45	1.70	2.04	20.12	95.29	60.14	31.67	28.47
02	6.60-7.00	1.47	1.90	30.04	97.46	62.03	32.33	29.70
	10.50-10.80	1.63	2.00	22.51	95.21	61.52	30.65	30.87
	13.65-13.85	1.59	1.95	22.51	89.62	63.77	30.11	33.66
04	3.00-3.40	1.57	1.92	22.49	86.77	/	/	/
	7.50-8.00	1.71	2.01	18.22	87.42	52.87	30.70	22.17
	10.00-10.50	1.68	2.02	20.59	94.23	54.62	31.78	22.83
05	4.75-5.35	1.63	1.97	20.88	88.34	49.88	31.30	18.57
	8.65-9.00	1.58	1.93	22.14	86.50	58.21	27.76	30.45
06	2.70-3.00	1.62	1.96	20.73	86.64	54.12	32.80	21.32
	7.80-8.20	1.60	1.98	23.44	95.17	/	/	/

Tab. 11 : Résultats d'analyse des paramètres physiques du site CW 52 ; MILA

Les différents échantillons s'approchent à une saturation d'eau complète, l'indice de plasticité indique un sol moyennement plastique à très plastique et la valeur de l'indice de plasticité « I_p » peut dépasser la valeur 41.

4.7.1.3.3 Caractéristiques œdométriques :

SC	Profondeur	Pression de	Coefficient de	Coefficient de
N°	(m)	consolidation	compressibilité C _c %	gonflement
		P_{c} (bars)		C_{g} %
01	8.80-9.20	2.38	0.196	0.040
	14.00-14.45	4.88	0.244	0.069
04	10.00-10.50	1.89	0.180	0.042
05	8.65-9.00	2.06	0.270	0.041
06	7.80-8.20	1.37	0.267	0.064

Tab. 12: Résultats d'analyse des paramètres mécaniques du site CW 52; MILA

D'après la classification selon le coefficient de gonflement,

Si: $0.035 < C_g \le 0.055$; alors le sol dit de gonflement fort;

 $C_g > 0.055$; alors le sol dit de gonflement très.

On peut dire qu'on est en présence d'un sol argileux de gonflement fort à très fort. Ces résultats mentionnés ci-dessus, indiquent l'état de sol, surconsolidé, saturé d'eau, compressible et présentant un caractère gonflant.

4.7.1.4 Site Ferdjioua

Ce site est situé dans la commune de Ferdjioua dans la Wilaya de Mila. Du point de vue orographique cette région fait partie des massifs montagneux de la petite Kabylie et, montre un relief fortement accidenté.

La région comprend les dépressions intra-montagneuses de Ferdjioua qui ont un relief en collines aux côtes absolues de 400 à 600 m. Au Nord il est limité par les massifs du Djebel Boucherf (1150 m), El-Hadid, El Btahi et au Sud par les Djebels Skouna, Hamara (1037m).

Le réseau hydrographique est représenté par quelques petits Oueds qui n'ont généralement un écoulement que pendant la période des pluies. Le Climat est sec et Chaud en été et froid en hiver.

Le réseau routier est assez développé. Il est représenté par des routes goudronnées liant la ville de Ferdjioua avec Mila, Sétif et Constantine.

GEOLOGIE DU SITE

La région est couverte par des cartes géologiques publiées par la SONATRACH en 1977 : feuille 34 (Sétif) à l'échelle 1 :200000, feuille 71 (Djemila) et feuille 72 (REDJAS EL FERDA) à l'échelle 1 : 50 000.

Du point de vue géotectonique la région fait partie de la zone structuro-tectonique de la petite Kabylie de l'Atlas Tellien. Celle-ci, se caractérise par un développement large des structures de chevauchement et des dépressions tectoniques fort abaissées.

La structure géologique de la région est constituée de dépôts du Crétacé et du Paléogène formant des assises fort disloquées des nappes telliennes. Les dépressions tectoniques de Ferdjioua sont remplies d'une assise épaisse de dépôts Néogène quaternaires qui sont des formations de l'autochtone de Post-chevauchement (Argiles résiduelles).

1. SERIE TECTONIQUE TELLIENNE

Les dépôts de la série tectonique tellienne constituent les massifs, montagneux des Djebels BOU-CHERF, HADDID, SKOUNA HAMARA et autres. Plus au Nord et au Sud de la ville de FERDJIOUA ces dépôts-là sont représentés par les roches du Crétacé inférieur et supérieur, du Paléogène et de l'Eocène à composition essentiellement carbonatée : calcaires, marnes, calcaires marneux, argiles carbonatées etc.

2.MIO-PLIOCENE

Les dépôts du Mio-pliocène continental non différenciés représentent des formations de l'autochtone de Post-chevauchement.

Dans la région des travaux ils remplissent la grande dépression FERDJIOUA allongée en direction sublatitudinale. La surface totale couverte par ces dépôts constitue plus de 200 km².

Dans la région de la localité de FERDJIOUA cette dépression est la plus étroite et elle a une largeur d'environ 3 à 4 Km.

La coupe du Mio-pliocène montre des argiles alternant avec des conglomérats et des calcaires lacustres à pendage subhorizontal.

3.QUATERNAIRE

Les dépôts quaternaires sont peu répandus. Ils ne sont largement répandus que dans les piedmonts des versants où leur épaisseur atteint par endroits 4 à 8 m, et dans la ligne de partage des eaux où leur épaisseur est de 0.5 à 3.0 m.

4. ROCHES ARGILEUSES

Les roches argileuses du territoire étudié sont associées aux dépôts d'âge Moi-Pliocène et Quaternaire.

Les argiles sont de couleur jaunâtre et gris brunâtre, la plasticité moyenne à élevée (l'indice de plasticité 22.3 à 31.2). Leur composition granulométrique est la suivante :

Grandes inclusions	$\emptyset > 2 \text{ mm}$	0.11 à 3.3 %
carbonatées		
Fraction sableuse	$0.063 < \emptyset < 2.0 \text{ mm}$	5.0 à 16.7 %
Fraction en poussière	$0.005 < \emptyset < 0.063$	23.0 à 35.4 %
Fraction d'argile	Ø < 0.005	55.8 à 70.5 %

Tab. 14 : Composition granulométrique de l'argile totale du Ferdjioua

L'indice de plasticité varie de 15.21 à 31.19. D'après l'indice de plasticité les argiles de ce site ont une plasticité moyenne à élevée.

Compte tenu de la classification du standard d'état GOST – N° 9169-75 (Normes en vigueur en U.R.S.S.) et des données des essais physico-mécaniques, des analyses chimiques et structurales par rayons X, on peut faire les conclusions suivantes :

- Vu le nombre, les dimensions et l'aspect des inclusions à grain grossier (le nombre des inclusions aux dimensions dépassant 0.5mm). elles font partie du groupe d'argiles à faible teneur en inclusions.
- Vu leur plasticité ces argiles font partie du groupe d'argiles à plasticité moyenne à élevée.
- Vu la valeur de la résistance mécanique à la flexion à l'état sec kg/cm³. Les argiles du gisement font partie du groupe d'argiles à résistance mécanique modérée.
- Vu la teneur en Al₂O₃, elles se rapportent aux argiles acides.

4.7.1.5 SITE DE KHERROUBA

Kherrouba se trouve à 1.5km à l'Est de la ville de Mila. De coordonnées : $X = 355\,800$, $Y = 821\,400$ (carte topographique n° 73, Constantine au 1/50 000).

La partie orientale se place dans la zone de partage des eaux d'une montagne située entre les oueds Makra et CHABOUDJA.

Sa partie occidentale embrasse le flanc Ouest de cette hauteur où la pente du relief est de 9 à 11° vers l'Ouest.

Les altitudes absolues varient entre 510.7m et 450.6m et seulement dans l'extrême Sud-Est elles atteignent 532.3m.

Dans cette région, le réseau hydrographique fait défaut des ruisseaux peu nombreux dans des ravins profonds sont secs en été.

Le climat de la région est caractérisé par un été sec et chaud et un hiver pluvieux et doux.

Les terrains miocènes sont formés d'argile à gypse à hélices dentées ; de poudingues du Koudiat Aty ; de marnes à Ostrea crossissima ;

Les terrains pliocènes se résume en calcaires lacustres d'EL HADJ BABA; des calcaires gris-rosâtre, parfois blancs à faune d'eau douce. La puissance des calcaires atteint 100

mètres. Ils forment de hauts plateaux entre les massifs de Chettaba et Dj. Akhel dans la partie Sud de la région, et enfin des éboulis de calcaires Pliocènes.

Ces formations comprennent des argiles brunâtres avec de nombreux fragments et blocs de calcaires gris – rosâtres.

Les terrains quaternaires : Ce sont des argiles et limons déluviaux avec de nombreuses et grosses inclusions carbonatées. Les dépôts quaternaires jouissent d'une grande extension au pied des pentes où leur épaisseur atteint localement 4 à 6m. Sur les sommets les terrains quaternaires ont généralement une petite épaisseur, de l'ordre de 0.5 à 3m.

Dans les limites de la surface prospectée (dans un rayon de 10 km autour de Mila), outre les argiles à briques et tuiles, on trouve également des éboulis de calcaires pliocènes, ainsi que des grès développés dans la région du village d'Azeba.

Les résultats des analyses chimiques des argiles ont donnés la composition suivante :

```
SiO<sub>2</sub>: 53.16%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 14.80%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 6.61%; TiO<sub>2</sub>: 0.79%; CaO: 7.97%; MgO: 1.95%; Na<sub>2</sub>O: 0.76%; K<sub>2</sub>O: 1.31%; SO<sub>3</sub>: 0.68%; P.a.f.: 11.92%.
```

Poids Volumique:

Le poids volumique moyen des argiles déterminé au laboratoire est de 2.05 gr/cm³ (1.94-2.16 gr/cm³). Le poids volumétrique déterminé dans les conditions de terrain est de 2.08 gr/cm³.

Le coefficient d'altération était de 1.58; Selon le poids volumiques ces argiles appartiennent aux variations semi dense.

Poids Spécifique:

Le poids spécifique moyen des argiles déterminé sur 8 échantillons est de 2.79 g/cm³ avec un minimum de 2.73 et un maximum de 2.81 g/cm³.

L'humidité naturelle a été déterminée sur 21 échantillons d'argiles. Elle est supérieure à 11.56 %.

Hiérarchisation des formations argileuses et établissement de la carte de susceptibilité visà-vis du retrait – gonflement

5.1 Hiérarchisation des formations argileuses et marneuses quant à leur susceptibilité supposée vis-à-vis des phénomènes de retrait- gonflement.

5.1.1 Critère Lithologie

Les éléments qui influent sur la susceptibilité au retrait- gonflement sont :

- ✓ en premier lieu la **lithologie** de la formation (c'est à dire principalement la proportion de matériaux argileux, autrement dit d'éléments fins inférieurs à 2 mm).
- ✓ en moindre proportion, mais non négligeable, la géométrie de la formation argileuse influe sur la susceptibilité au retrait- gonflement. En effet, une formation sera d'autant plus sujette à ce phénomène qu'elle sera en position superficielle et de géométrie épaisse et continue.

Le principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère lithologique est illustré sur le tableau 15 tandis que le tableau 16 montre les « Notes lithologiques » attribuées aux formations argileuses et marneuses de l'étude.

Type de formation	Susceptibilité	Note lithologique
Formation non argileuse mais contenant localement des passées ou des poches argileuses (ex : alluvions avec lentilles argileuses, calcaire avec poches karstiques,	faible	1
Formation présentant un terme argileux non prédominant de type calcaire argileux ou sable argileux	Moyenne	2
Formation à dominante argileuse, présentant un terme ou une passée non argileuse (ex : alternance marno calcaire ou sablo argileuse) ou très mince (moins de 3m)	Forte	3
Formation essentiellement argileuse ou marneuse, d'épaisseur supérieure à 3 m et continue	Très forte	4

Tableau 15 : – Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère lithologique

Nom de la formation géologique	Note lithologique
Alluvions récentes du Quaternaire	1
Argiles	4
Argiles à Kaolin	4
Calcaires marneux	2
Gypses	1
Marnes et calcaires marneux	3

Tableau 16 : – « Notes lithologiques » attribuées aux formations argileuses et marneuses.

5.1.2 Critère minéralogique

Rappelons que le terme argile désigne à la fois une classe granulométrique ($< 2 \mu m$) et une nature minéralogique correspondant à la famille des phyllosilicates. Les phénomènes de retrait - gonflement s'expriment préférentiellement dans les minéraux argileux appartenant au groupe des smectites et dans une moindre mesure au groupe de la vermiculite et des minéraux interstratifiés comme le chlorite gonflant de type C - V (chlorite vermiculite) ou V- Cg (vermiculite chlorite gonflante).

Les échantillons (30 échantillons) prélevés sur sites ont été soumis à différentes observations microscopiques réalisées l'Université de Liège en Belgique, (Laboratoire de Géologie et Paléoclimat) et en Tunisie à l'ENIT, (Unité de Recherche Ingénierie et Géotechnique):

- ✓ L'examen au microscope polarisant a permis d'observer les modifications sur la porosité de la matrice par la présence de structures biogènes.
- ✓ L'observation sous microscopie électronique à balayage (M E B), a révélé que la structure argileuse est formée minéralogiquement par de la kaolinite en majeure partie représentée par des formes hexagonales des feuillets de 02 à 05 μm. L'espace interfoliaire de ces argiles peut renfermer des minéraux secondaires ayant des propriétés minéralogiques et mécaniques différentes de minéraux principaux.
- ✓ Les méthodes de rayons X, (D R X & X R D) ont montré que la composition de l'argile à son état naturel (l'argile brute) est principalement argileuse avec la présence du quartz, calcite, feldspaths et anhydrite. Le tableau 17 illustre les proportions de ces minéraux.

Minéral	Pourcentage Relatif moyen (%)		
Argile totale	53		
Quartz	30		
Calcite	11		
Feldspaths – K	4		
Anhydrite	2		

Tableau 17 : – Dépouillement des proportions minéralogiques dans l'échantillon brut.

L'analyse D R X de la fraction argileuse inférieure à 2 microns (réalisée sous la forme d'agrégats orientés après extraction du matériau global) fournit une bonne estimation à la fois qualitative et semi quantitative des divers composants argileux, qu'il s'agisse de minéraux simples et/ou interstratifiés présents grâce à l'application de trois tests diagnostiques classiques :

- ✓ séchage de l'agrégat orienté (passage au diffractomètre à l'état dit naturel ou normal, N),
- ✓ après solvatation aux polyalcools (avec l'éthylène glycol, EG, ou le glycérol, G l)
- ✓ et enfin après chauffage (500°C).

Le tableau 18 montre les proportions moyennes en différents minéraux.

Minéral	% moyen
Kaolinite	36 %
Vermiculite	29 %
V- Cg	35 %

Tableau 18 : – Analyse de l'argile totale aux rayons X d'une argile marneuse

Les bornes retenues pour la classification minéralogique (tableau 19), basée sur le pourcentage de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés) contenus dans la phase argileuse du matériau sont respectivement 25 %, 50 % et 80 %. Une note minéralogique a été attribuée à chacune des formations selon le barème du tableau suivant :

% moyen de minéraux gonflants	Susceptibilité	Note minéralogique
< 25%	Faible	1
25 à 50 %	Moyenne	2
50 à 80 %	Forte	3
>80%	Très forte	4

Tableau 19 : – Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère minéralogique.

L'illustration 20 synthétise les notes minéralogiques attribuées aux formations argileuses et marneuses.

Nom de la formation géologique	Note minéralogique
Alluvions récentes du Quaternaire	1
Argiles	3
Argiles à Kaolin	1
Calcaires marneux	1
Gypses	1
Marnes et calcaires marneux	2

Tableau 20 : – Notes minéralogiques attribuées aux formations argileuses et marneuses.

5.1.3 Critère géotechnique

Les principaux essais dont les résultats sont utilisés pour caractériser le comportement géotechnique du matériau vis-à-vis du phénomène retrait – gonflement sont :

- ✓ Indice de plasticité : Les sols argileux se caractérisent par la grande influence de la teneur en eau sur leur comportement mécanique. L'indice de plasticité représente « l'aptitude de l'argile à acquérir de l'eau ».
- ✓ VBS (valeur du bleu de méthylène): Le bleu de méthylène est en effet absorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (illites et kaolinites) sont peu sensibles au bleu.

Dans le cadre de cette étude, ces deux caractéristiques ont été déterminées sur les échantillons prélevés (30 échantillons). Nous avons également recueilli les données, dans

la bibliographie et auprès des laboratoires de géotechnique qui travaillent dans le secteur de cette étude. Nous les avons analysées et confrontées avec nos propres résultats.

Les bornes utilisées pour chacun de ces paramètres sont représentées dans le tableau 21 suivant :

Valeur du Bleu	Indice de plasticité	susceptibilité	note géotechnique	
< 2.5	< 12	Faible	1	
2,5 à 6	12 à 25	Moyenne	2	
6 à 8	25 à 40	Forte	3	
>8	≥ 40	Très forte	4	

Tableau 21 : – Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère géotechnique.

L'illustration 22 synthétise les notes minéralogiques attribuées aux formations argileuses et marneuses.

Nom de la formation géologique	Note Géotechnique (Indice de plasticité)	Note Géotechnique (Valeur de bleu)
Alluvions récentes du Quaternaire	1	1
Argiles	4	3
Argiles à Kaolin	2	2
Calcaires marneux	1	1
Gypses	1	1
Marnes et calcaires marneux	2	2

Tableau 22 : – « Notes géotechniques » attribuées aux formations argileuses et argilo-marneuses.

5.2 CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ

Conformément à la méthodologie éditée par le BRGM, chaque formation est caractérisée par quatre notes ; une note pour chacun des critères pris en compte. Le degré de susceptibilité de la formation considérée est égal à la moyenne entre ces quatre notes. Les classes de susceptibilité sont illustrées dan le tableau 23 suivant :

Note moyenne	Degré de susceptibilité	
Valeur ≤ 2	Faible	
$2 < Valeur \le 3$	Moyen	
Valeur > 3	Fort	

Tableau 23 : – Classes de susceptibilité des formations argileuses et marneuses.

L'évaluation du degré de susceptibilité de ces formations au phénomène est illustrée sur le tableau 24.

La figure 53, qui représente la carte de susceptibilité retrait-gonflement de la wilaya de Mila, est établie à partir de la carte synthétique des formations argileuses et marneuses de la wilaya et des degrés de susceptibilité ainsi obtenus pour chaque formation argileuse.

Nom de la formation	Notes Lithologique	Notes Minéralogique	Notes Géotechnique		Degré de susceptibilité
géologique	<i>C</i> 1		ΙP	VBS	1
Alluvions récentes	1	1	1	1	1
du Quaternaire					
Argiles	4	3	4	3	3,5
Argiles à Kaolin	4	1	2	2	2,25
Calcaires marneux	2	1	1	1	1,25
Gypses	1	1	1	1	1
Marnes et calcaires marneux	3	2	2	2	2,25

Tableau 24 : – Evaluation du degré de susceptibilité des formations argileuses et marneuses.

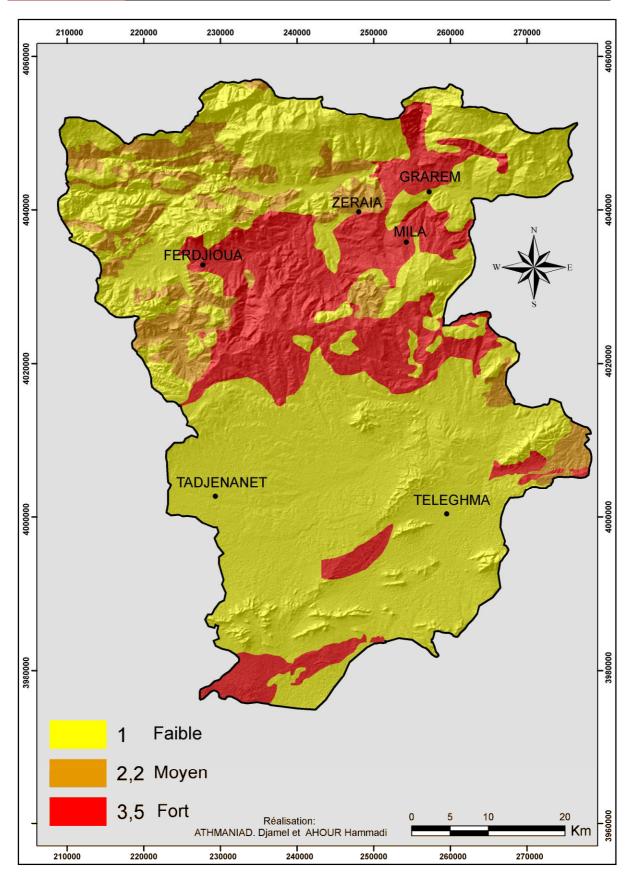


Fig. 53 Carte de susceptibilité au retrait-gonflement et classification des différentes zones

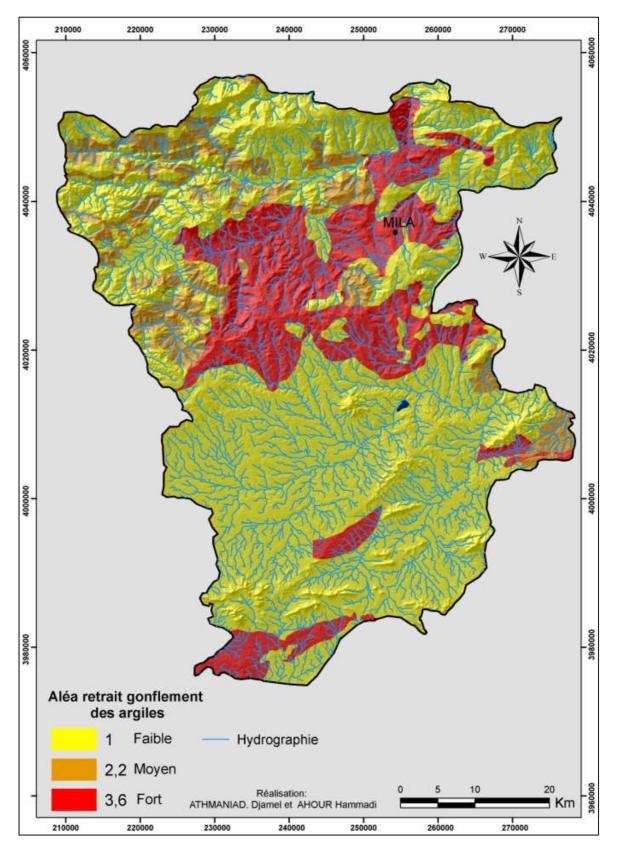


Fig. 54 Carte de susceptibilité et réseau hydrographique

L'analyse de cette carte montre les répartitions suivantes :

- ✓ 21,83 % (soit environ 765 km²) sont classés en zone à susceptibilité forte; (argile),
- ✓ 12.36 % (soit environ 432 km²) en zone à susceptibilité moyenne, (marne, kaolin, gypse);
- ✓ 50.14 % (soit environ 1756.km²) en zone susceptibilité faible; (alluvions)
- ✓ 15.66% (soit environ 549 km²) de la surface sont considérés en zone à susceptibilité nulle ou négligeable.

5.3 CONCLUSION

L'ensemble de ces résultats demande à être amélioré par d'autres analyses géotechniques mieux réparties. Mais on peut déjà synthétiser quelques informations intéressantes pour une définition de la susceptibilité retrait-gonflement des argiles dans la wilaya de Mila.

- ➤ Sur les 3502 km² que compte la wilaya de Mila, près de 22 % de cette superficie est classée en zone de susceptibilité forte et plus de 12 % en zone de susceptibilité moyenne. Pour cette dernière, il s'agit le plus souvent de formations relativement superficielles, qui recouvrent les argiles de la classe précédente. La qualité du sous sol ne doit pas s'améliorer en profondeur. On peut donc estimer à près de 35 % du territoire de la wilaya comme sol sensible au phénomène de retrait gonflement induisant potentiellement des sinistres.
- La wilaya de Mila et d'autant plus exposée au phénomène que les sols se trouvent dans un état partiellement saturé puisque le niveau de la nappe phréatique est à une profondeur comprise entre 10 m et 15 m. Les conditions climatiques, semi-arides, et la présence d'ouvrages sur ce type de sol provoquent un changement d'humidité et par conséquent des déformations.
- Les principales localités de la wilaya (Mila, Grarem, Ferdjioua, Zraïa, Sidi Méroune, ...) se trouvent sur des zones à forte susceptibilité. Il est évident que des précautions particulières à ce type de sols doivent êtres observées lors des travaux d'aménagement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette étude était d'établir une cartographie des zones sensibles au phénomène retrait – gonflement dans le Bassin de Mila et de procéder à une indentification minéralogique et géotechnique des argiles présents dans ces sols et déterminer leur proportion.

Identification minéralogique et géotechniques des argiles

La démarche de l'étude a d'abord consisté en l'établissement d'une cartographie synthétique des formations argileuses ou marneuses affleurantes à sub-affleurantes, à partir de la synthèse des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 et d'observations bibliographiques existantes. Les contours des sols argileux ont été affinés sur la base de critères lithologiques, prenant en compte également l'épaisseur et la continuité des termes argileux au sein des formations.

La carte synthétique que nous avons élaborée montre que sur un territoire de 3502 km² les formations argilo marneuses occupent un peu plus de 30% de la surface totale.

Les Facteurs climatiques qui peuvent déclencher le phénomène de retrait gonflement ont été pris en considération. On peut retenir les paramètres suivants :

- Le bassin de Mila est traversé par deux grands oueds principaux, Oued Endja à la limite NW du bassin versant et oued El Kébir qui allonge la limite NE du bassin
- Selon **l'indice d'aridité**, nous considérons notre région d'étude, comme une région semi-aride à sub-humide.
- Notre approche par images satellitaires et le système « SIG », montre que la **densité de drainage** est très importante.
- **Pluviométrie :** La wilaya de Mila se situe dans une zone où la pluviométrie moyenne inter- annuelle est entre 400 à 700 mm du Sud au Nord. A noter que plus de la moitié de la lame d'eau est reçue par le bassin versant pendant l'hiver.
- **Température :** La température moyenne inter -annuelle est de l'ordre de 17°C.
- L'analyse de la courbe Ombro-thermique montre que, la période humide débute de la fin d'octobre, jusqu' à la fin du mois de mai, tandis que la période sèche qui commence à partir de début du mois de juin, se prolonge jusqu' au mois d'octobre. Les mois de juin, juillet, août et septembre sont les plus chauds de l'année, la moyenne du mois de juillet est aux alentours de 27°C.

Ces formations argileuses ou marneuses identifiées ont fait l'objet d'une analyse minéralogique de leur phase argileuse (proportion de minéraux gonflants de type smectites et interstratifiés vermiculite/chlorite-gonflante) et leur comportement géotechnique (évalué principalement à partir des limites d'Atterberg, de la valeur de bleu et de l'essai de compressibilité).

Plus de trente échantillons représentatifs des formations traversées par ces sondages ont subi des analyses minéralogiques de rayons X afin de déterminer la composition du sol ainsi que les minéraux argileux présents. Cette analyse montre que la kaolinite est présente en très forte proportion : une moyenne supérieure à 40% ; La smectite est en plus faible proportion (moins de 5%); La contribution des interstratifiés au phénomène de retraitgonflement (chlorite-vermiculite, chlorite-smectite, vermiculite/chlorite-gonflante) est quantifiée car elle très remarquable.

Les interstratifiés (minéraux secondaires) et la smectite sont très sensible au phénomène de retrait gonflement, surtout en zone semi-aride.

Les valeurs des indices de plasticité varient de 15 % à 41 %. Ce qui dénote des argiles de plasticité moyenne à élevée.

La Valeur de Bleu de Méthylène (VBS) qui traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol se situe entre 3 et 6. Ce qui témoigne qu'on est en présence de sols limoneux à argileux.

Essai de Compressibilité à l'ædomètre.

Pour l'évaluation des déformations sous les contraintes appliquées, nous avons réalisé des essais de compressibilité à l'œdomètre, qui ont montré que les sols en question sont :

- Surconsolidés Pc (bar): 3,00 < Pc < 3,30
- Moyennement compressibles à très compressibles C_c % : 15,6 < C_c < 27,8
- Sol Gonflant $C_g : 0.07 < C_g < 0.01$

D'autres facteurs de prédisposition ou de déclenchement du retrait-gonflement des argiles ont été pris en considération :

- Facteurs morphologiques,
- Facteurs biogéographiques.

Lors de l'établissement de la carte de susceptibilité au retrait-gonflement nous avons adopté une démarche mise au point par le Bureau français de recherches géologiques et minières (BRGM). Les formations argileuses et marneuses identifiées sur la carte synthétique ont fait l'objet d'une hiérarchisation quant à leur susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Les critères utilisés pour établir cette hiérarchisation sont liés à la caractérisation lithologique de la formation, la composition minéralogique de sa phase argileuse et son comportement géotechnique, ce qui a conduit à l'établissement d'une carte de susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement.

L'analyse de la carte que nous avons réalisé fourni quelques informations intéressantes pour une définition de la susceptibilité retrait-gonflement des argiles dans la wilaya de Mila.

- Sur les 3502 km² que compte la wilaya de Mila, près de 22 % de cette superficie est classée en zone de susceptibilité forte et plus de 12 % en zone de susceptibilité moyenne. Pour cette dernière, il s'agit le plus souvent de formations relativement superficielles, qui recouvrent les argiles de la classe précédente. La qualité du sous sol ne doit pas s'améliorer en profondeur. On peut donc estimer à près de 35 % du territoire de la wilaya comme sol sensible au phénomène de retrait gonflement induisant potentiellement des sinistres.
- Cette wilaya et d'autant plus exposée à ce phénomène que dans cette région les sols se trouvent dans un état partiellement saturé puisque le niveau de la nappe phréatique est à une profondeur comprise entre 10 m et 15 m. Les conditions climatiques, semi-arides, et la présence d'ouvrages sur ce type de sol provoquent un changement d'humidité et par conséquent des déformations.

• Les principales localités de la wilaya (Mila, Grarem, Ferdjioua, Zraïa et Sidi Méroune, se trouvent sur des zones à forte susceptibilité. Il est évident que des précautions particulières à ce type de sols doivent êtres observées lors des travaux d'aménagement.

L'information géotechnique et sa visualisation sur support cartographique ont un grand intérêt pour l'établissement des cartes géotechniques spécifiques à chaque phénomène au fur et à mesure que les informations sur une région donnée progressent. Ces cartes permettent, par recoupement de l'information, d'anticiper sur la phase de reconnaissance préliminaire pour les futurs projets.

Nous avons présenté une approche d'analyse de variabilité des paramètres de gonflement pour la wilaya de Mila en utilisant le S.I.G. Les résultats obtenus mettent en évidence le caractère expansif des argiles et argiles marneuses de ce Bassin essentiellement au niveau des extensions de la ville. Par conséquent, le recours à ces cartes peut faciliter la projection urbanistique tout en prenant en compte l'existence de ces marnes. Une autre technique permet aussi d'estimer les paramètres de gonflement par l'établissement de modèles de prévision sachant aussi que les essais de mesure des paramètres de gonflement sont longs et coûteux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFES M. (1996). Contribution à la détermination des paramètres de gonflement des sols et étude de l'argile de Mila (Algérie) traitée à la chaux. Thèse de doctorat, INSA, Lyon, 300 pp
- [2] AÏSSA MAMOUNE S.M. (2002). Contribution à la mesure, prévision et modélisation du comportement des sols expansifs. Thèse magister, D G C Faculté des Science de l'Ingénieur, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen. Algérie -
- [3] ATHMANIA D.; BENAÏSSA A.; BOUASSIDA M. (Juin 2010).- Clay and Marl Formation Susceptibility in Mila Province, Algeria Geotechnical and Geological Engineering. DOI 10.1007/s10706-010-9341-5 ORIGINAL PAPER received: 6 April 2010 Accepted: 15 June 2010 Springer Science 2010.
- [4] ATHMANIA D.; BENAÏSSA A.; BOUASSIDA M. (2009). Propriétés minéralogiques des argiles gonflantes de la wilaya de Mila. Colloque international Sol Non Saturés et Environnement. Tlemcen Algérie 27 et 28 octobre 2009, pp. 425-435
- [5] BENAÏSSA A., BELLOUCHE M. A (1999). Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrain dans l'agglomération de Constantine. Bulletin of Engineering Geology and Environment Vol. 57 N° 3.
- [6] BERNON N. avec la collaboration de Chrétien P., Dècle B., Imbault M. et Vincent M. (2009) Cartographie de l'aléa retrait gonflement des sols argileux dans le département de l'Oise. Rapport BRGM/ PR 57154 FR, 129 pages.
- [7] BLAYAC J. (1912). Esquisse géologique du bassin de la Seybousse et quelques régions voisines. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, (2), n°6. Alger.
- [8] BOUASSIDA. M (2006). «Modeling the behavior of soft clays and new contributions for soil improvement solutions» Keynote Lecture. Proc. 2nd Int. Conf. on Problematic Soils. December 3-5th 2006. Petaming Jaya, Salengor, Malaysia. Editors Bujang, Pinto & Jefferson, 1-12.
- [9] BOUASSIDA. M.; Boussetta S. (1999). «On the Determination of Vane Shear Strength of Soft Soils». Proc. 12th African Regional Conference Int. Conf. of Soil Mech. and Geotech. Eng. October, 24th-27th, Durban (South Africa), 285-291.
- [10] BOUCHUT J., GIOT D., CRUZ MERMY D. avec la collaboration de Demelemestre F., Halbwachs C. (2004) Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de Loir-et-Cher. *Rapport BRGM/RP-52950-FR*. 192 p.
- [11] BOUILLIN J.-P., DURAND DELGA M., GERALD J.-P., LEIKINE M., RAOULT J.-F., RAYMOND D., TEFIANI M. et VILA J.-M. (1970). Définition d'un flysch massylien et d'un flysch maurétanien au sein des flyschs allochtones de l'Algérie. C. R. Acad. Sc. Paris, (D), t 270, p. 2 249- 2 252. (1973). Les olistostromes d'âge miocène

- inférieur liés aux flyschs allochtones kabyles de l'orogène alpin d'Algérie. Bull. Soc. géol. France, (7), t. XV, p. 340-344, 1 fig.
- [12] BUSNARDO R. (1954). Structure de la bordure Sud-Ouest du Djebel Ouasch (département de Constantine). C. R. Acad. Sc. Paris, t. 238, 828-830. (1956). Précisions nouvelles sur les recouvrements de la région de Constantine. *Ibid.*, t. 242, 658-660.
- [13] CAILLERE S., HENIN S. (1963) Minéralogie des argiles. Masson, Paris, 343 p.
- [14] CARRIERE M., CHEVALIER M., Toulemont M. et Verdier M. (1996) Sécheresse et catastrophe naturelle. Aspects techniques, juridiques et administratifs. "Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse". *Journées d'étude de l'École des Ponts*, Paris, 11-12/12/1996.
- [15] Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de Vaucluse BRGM/RP-53187-FR Rapport final 141 Filliat G. (1981) La pratique des sols et fondations Editions du Moniteur. N°*ISBN* : 2-86282-162-4.
- [16] CHASSAGNEUX D., STIELJES L., Mouroux P. et avec la coll. De Ducreux G.-H. (1995) Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse/pluie) dans la région de Manosque (Alpes de Haute Provence). Echelle communale et départementale. Approche méthodologique. *Rapport BRGM* R 38695.
- [17] CHASSAGNEUX D., STIELJES L., Mouroux P., Ménillet F. et Ducreux G.-H. (1996) Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence. *Rapport BRGM R39218*, 33 p., 6 fig., 1 tab., 4 ann., 1 pl. hors-texte.
- [18] CHASSAGNEUX D., MEISINA C., Vincent M., Ménillet F. et Baudu R. (1998) Guide synthétique pour la prise en compte de l'aléa retrait-gonflement à l'échelle nationale. *Rapport BRGM R40355*, 33 p., 6 fig., 1 tabl., 1 ann., 1 pl. hors-texte.
- [19] COIFFAIT Ph.-E. (1992): Un bassin post-nappes dans son cadre structural: l'exemple du bassin de Constantine (Algérie nord orientale). Thèse ès Sciences, Université H. Poincaré, Nancy I, France, 502 p.
- [20] COIFFAIT P. –E. (1976). Aperçu stratigraphique et structural de la feuille d'El Aria. 2^e Séminaire nat. Sc. Terre, Alger. Mém. Ron. Inédit.
- [21] COIFFAIT B. et P. –E. (1974, 1975). Etudes des sites des barrages collinaires DO 1 à DO 20. Rapport interne C.U.R.E.R. Université de Constantine, inédit.
- [22] COOK, H.E., JOHNSON, P.D., Matti, J.C. and Zemmels, I., 1975. Methods of sample preparation and x-ray diffraction analysis in x-ray mineralogy laboratory, In: Kaneps A.G. et al. (Eds.), Init. Repts DSDP XXVIII, Print. Office, Washington DC, 997-1007.

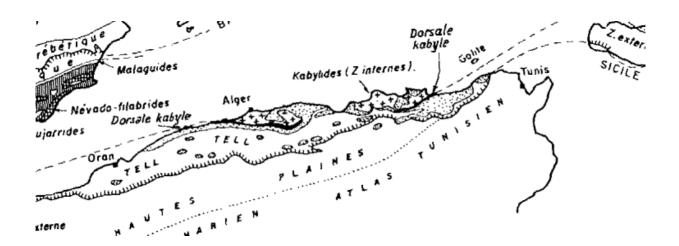
- [23] CUI M. (1996) Les apports de la mécanique des sols non saturés. "Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse". Journées d'étude de l'École des Ponts, Paris, 11-12/12/1996.
- [24] DEBRABANT P., FAGEL N., Chamley H., Bout V. & Caulet J.P. (1993). Neogene to Quaternary clay mineral fluxes in the Central Indian Basin. *Paleogeography*, *Paleoecology*, *Paleoceanography* 103, 117-131.
- [25] DURAND DELGA M. (1955). Etude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, 2^e Sér. Bull. n° 24, 1-533, 143 fig., 26 pl. (Thèse, Paris).
- [26] FAGEL N., Debrabant P., De Menocal P. & Dumoulin B. (1992). Utilisation des minéraux argileux pour la reconstitution des variations paléoclimatiques à court terme en Mer d'Arabie. *Oceanologica Acta*, 15, 125-136.
- [27] FAGEL N., André L., Chamley H., Debrabant P. & Jolivet L. (1992). Clay sedimentation in the Japan Sea since the Early Miocene: influence of source-rock and hydrothermal activity. *Sedimentary Geology* 80, 27-40.
- [28] FAGEL N., Debrabant P. & André L. (1994). Clay supplies in the Central Indian Basin since the Late Miocene: climatic or tectonic control? *Marine Geology*, 122, 151-172. CI: 1.675
- [29] FAGEL N., Robert C. & Hillaire-Marcel C. (1996). Clay mineral signature of the NW Atlantic Boundary undercurrent. *Marine Geology*, 130, 19-28. CI: 1.901
- [30] FAGEL N., Hillaire-Marcel C. & Robert C. (1997). Changes in the Western Boundary Undercurrent outflow since the last glacial maximum, from smectite/illite ratios in deep Labrador Sea sediments. *Paleoceanography* 12, 79-96. CI: 3.16
- [31] FERRY S., COTILLON P. et Rio M. (1983) Diagenese croissante des argiles dans des niveaux isochrones de l'alternance calcaire marne valanginienne du bassin vocontien. Zonation géographique. Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, Série 2: Mécanique Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre. 297; 1, p. 51-56.
- [32] FLANDRIN J., GOTTIS M., Viallix J.-R., Golenko N., Riche Ph., Parant J., Rebily G., Bejanin J., Issenmann O., Teisserenc P., Mollier M., Cochet E., Rivier F. et Goguel J. (1964) Notice explicative et Carte géol. France (1/50 000), feuille Sederon (916) Orléans: BRGM.
- [33] GIROUD D., ARGOUD G., Chamley H. et Masse J.-P. (1976) Sur la signification des minéraux argileux dans les sédiments de l'Aptien supérieur de Provence. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Série D: Sciences Naturelles*. N°282; 18, p. 1673-1675.
- [34] GOUVERNET C., GUEIRARD S., Catzigras F., Colomb E., Gervais J., Blanc J.-P., Habib P. (1992) Les sécheresses de 1989 et 1990. *Revue Française de Géotechnique*, n° 58, p. 7-30.

- [35] J.-M. VILA (1977) feuilles (N-O_ 3-4 et P-Q_3-4 et 72; 73), selon le tableau d'assemblage des feuilles au 1/200 000 et au 1/50 000 publiées en 1977 par le service de la carte géologique de l'Algérie, 53 p.
- [36] KERT C. (1999) Les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France. Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. N° 1540 Assemblée Nationale, n° 312 Sénat, avril 1999.
- [37] LAUTRIN D. (1989) Utilisation pratiques des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., n° 160, pp. 29-41.
- [38] Le ROY S., ODENT B.E., et Vincent M. (2007) Actualisation de la carte d'aléa retrait gonflement des sols argileux dans le département de l'Yonne. Rapport BRGM/ PR 55546 FR, 37 pages
- [39] MEBARKI A. (1982). Le Bassin du Kébir Rhumel (Est Algérien) : Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau. Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle, Université de Nancy II, 304 pp
- [40] MOORE, D.M. and REYNOLDS, R.C., Jr. (1977) X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford New York, Oxford Univ. Press, 378 pp.
- [41] NOEL C. (1991) Tassement de sols d'assise de fondations consécutifs à la sécheresse. L'expertise dans le cadre de la garantie "catastrophes naturelles". SNEICINFO, 4
- [42] MEBARKI A (1982) Hydroge´ologie de surface et aménagement des ressources en eau, the`se de doctorat de 3e`me cycle Nancy II (France), p 304
- [43] MOORE DM, Reynolds RC Jr (1989) X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, Oxford, p 332
- [44] MAGNAN J.-P. et YOUSSEFIAN G. (1989) Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées*, 159, 93-104.
- [45] MASTCHENKO A. (2001) Sécheresse et sols argileux. Projet industriel Alpha Sol. *Ecole des Mines d'Alès*, 74p. 9 ann. 142 BRGM/RP-53187-FR Rapport final
- [46] MEISINA C., CHASSAGNEUX D., Leroi E. et Mouroux P. (1998) Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux. Proposition de méthodologie. Article et présentation au 8e Congrès de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement.
- [47] MILLOT G. (1964) Géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.
- [48] MOUROUX P., MARGRON P. et Pinte J.-C. (1988) La construction économique sur sols gonflants. *Manuel et méthodes* n°14, 125 p., BRGM Editeur.

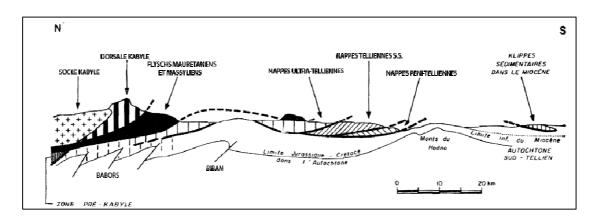
- [49] NORIE A. et VINCENT M. (2000) Etablissement de plan de prévention des risques naturels prévisibles : « Mouvements différentiels de terrain liés au phénomène de retrait gonflement des sols argileux : approche méthodologique dans le département des Deux Sèvres » Rapport BRGM /RP-50591-FR, 14 pages, 4 figures, 4 annexes.
- [50] PLATEL J.P., ESTÈVE A., TOMERA L. (2004). Cartographie de l'aléa retraitgonflement des argiles du département de la Gironde, BRGM/RP- 53382, 223 pages.
- [51] THOREZ J. (1976) Practical identification of clay minerals. In: Lelotte G (ed.). A handbook for teachers and students in clay mineralogy. Belgique, p 99
- [52] TUCKER M. (ed) (1988) Techniques in sedimentology. Blackwell Scientific Publications, London, p 349
- [53] VELDE B. (1995) Origin and mineralogy of clays and the environment. In: Bruce (ed.) XV, 356, p 182. ISBN: 978-3-540-58012-6

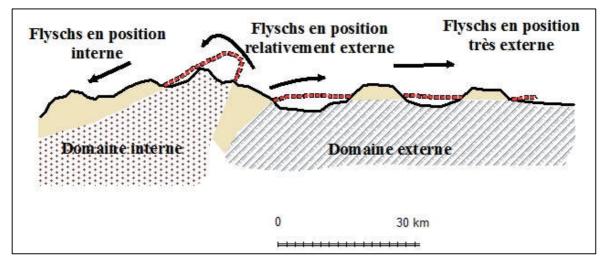
ANNEXE

ANNEXE 1: GEOLOGIE

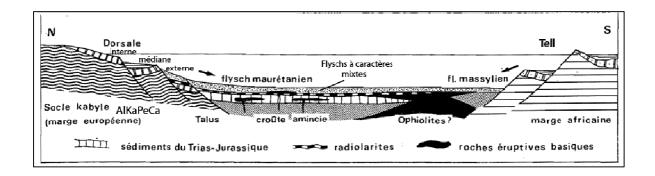


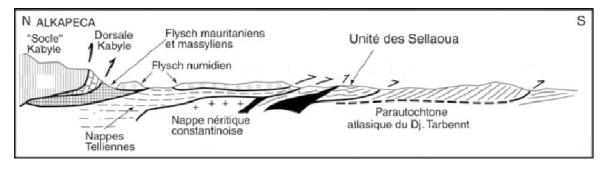
L'OROGENE ALPIN PERI-MEDITERRANEEN (DURAND-DELGA, 1969)



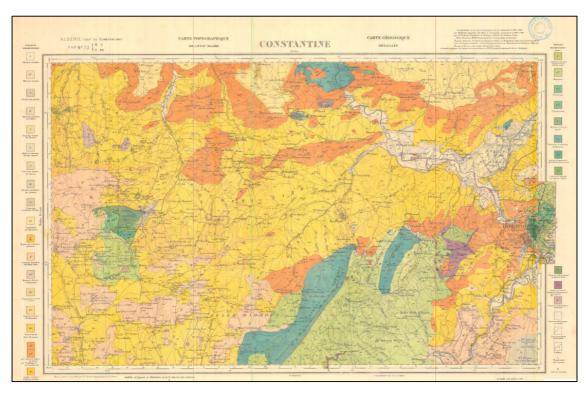


Partie Nord Orientale (Wildi, 1983; Durand Delga, 1969; Bouillin, 1977)

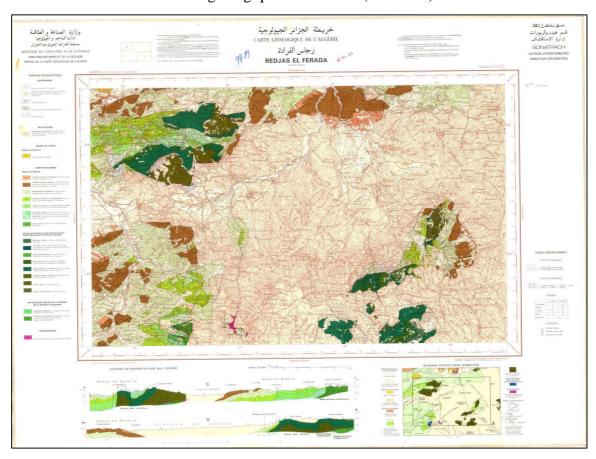




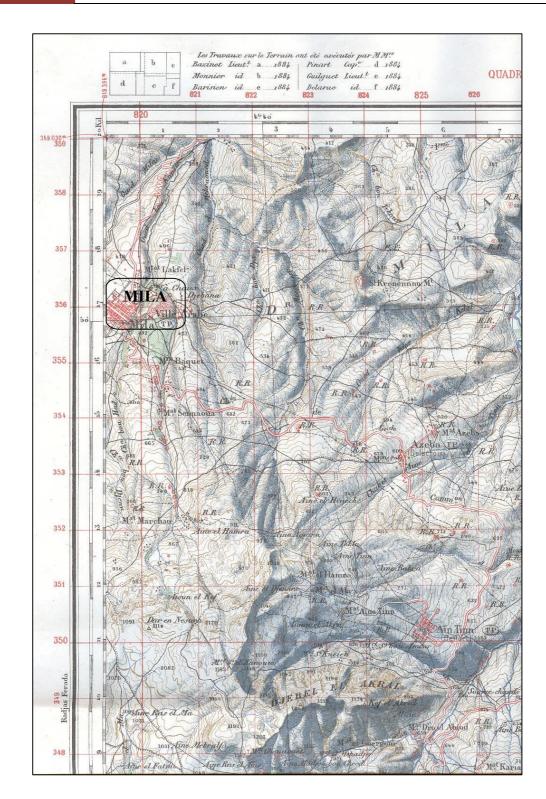
POSITION DES DIFFERENTES UNITES GEOLOGIQUES DES MAGHREBIDES (DOMZIG, 2006)



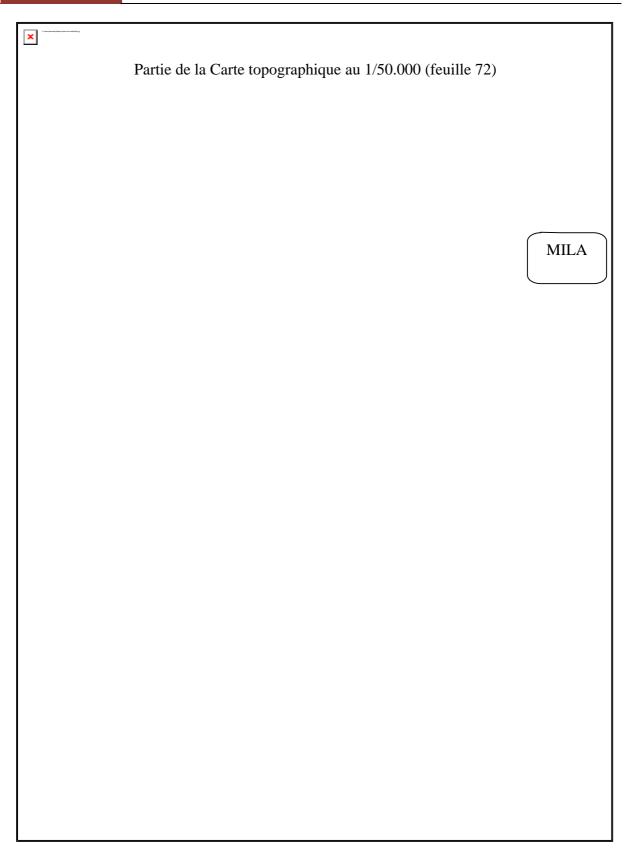
Carte géologique au 1/50.000 (feuille 73)



Carte géologique au 1/50.000 (feuille 72)



Partie de la Carte topographique au 1/50.000 (feuille 73)



Partie de la Carte topographique au 1/50.000 (feuille 72)

Tâches réalisées avec le logiciel ArcGIS

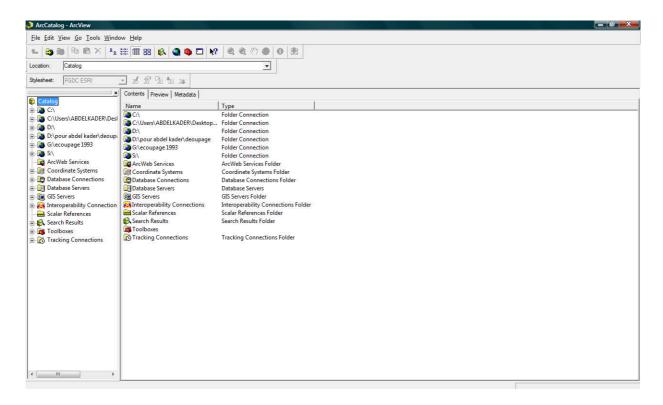
L'utilisation d'un SIG dans un projet fait appel aux applications bureautiques ArcGIS suivantes :

L'application ArcCatalog permet de gérer les stocks de données spatiales et la conception des bases de données ainsi que d'enregistrer et de visualiser les métadonnées « des données sur des données ».

ArcMap est utilisé pour toutes les tâches de cartographie et de mise à jour ainsi que pour les analyses associées aux cartes.

ArcToolbox est une fenêtre ancrable présente dans les applications ArcGIS qui permet d'effectuer les tâches de conversion et de géo-traitement.

A l'aide de ces trois applications, vous pouvez effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données et le géo-traitement.



L'arborescence Catalogue à gauche de la fenêtre ArcCatalog vous permet de naviguer dans les données SIG et de les organiser. Le contenu de la branche courante s'affiche sur le côté droit de la fenêtre Catalogue

Les entités sous Arc GIS

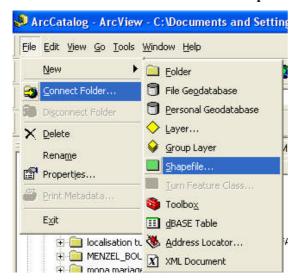
Les données vectorielles:

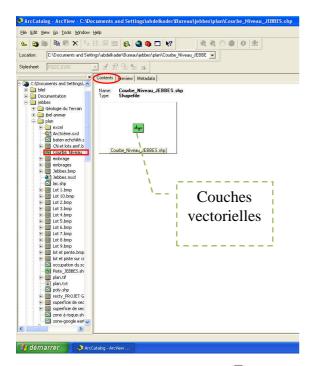
- Les géodatabases: format SGBD, gère toutes les entités (icones gris)
- Les « shapefile » ou fichiers de forme : 1 entité par fichier (icones verts)
 - points
 - lignes
 - □ polygones...

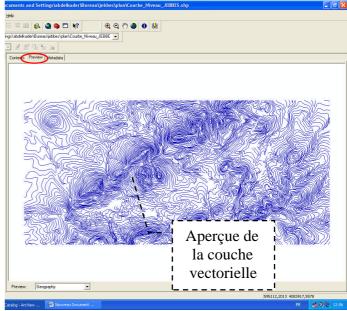
Les données « images »:

Les « raster » : les rasters sont des images, donc une matrice de pixels associée à une palette de couleurs.

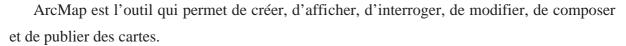
Création des fichiers de formes « Shapefile »



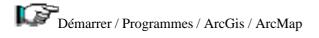


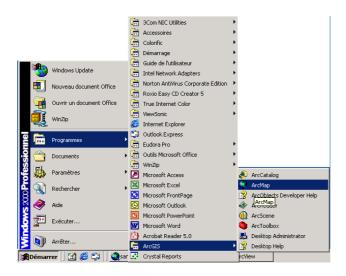


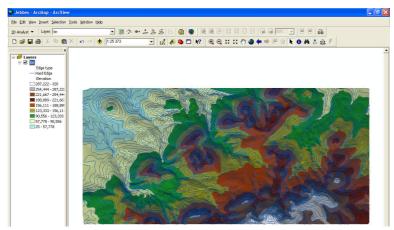
I- Lancement d'ArcMap



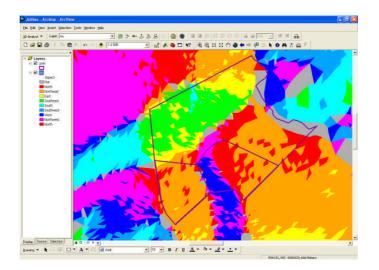
La plupart des cartes présentent d'emblée plusieurs types d'informations sur un secteur.

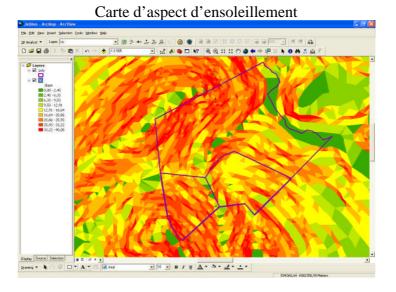






Modèle numérique de terrain





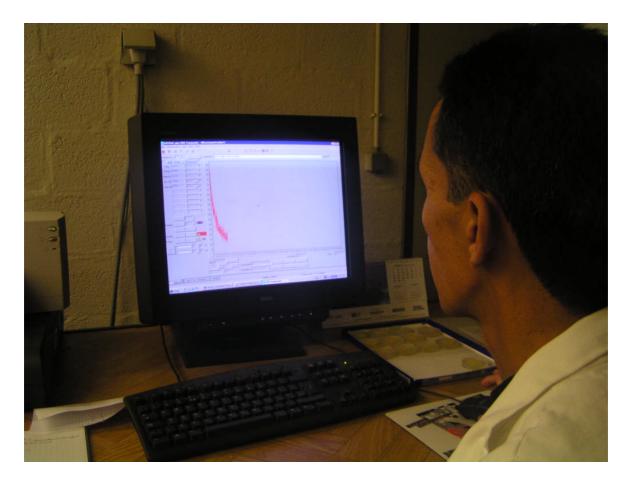
Carte de pentes

ANNEXE 2 : APPAREILLAGE ET METHODES DES RAYONS X

Mode d'emploi du diffractomètre Bruker D8-Advance







1. Allumer le refroidisseur (local broyage)

NB : vérifier régulièrement que le niveau de l'eau dans la cuve soit suffisamment élevé et ajouter de l'eau si nécessaire.

- Retirer la housse
- Mettre le bouton noir du refroidisseur sur 1, attendre que la température se stabilise à 20°C ou moins
- Ouvrir la vanne supérieure située à droite de la pompe pour assurer la circulation d'eau
- Ouvrir la fenêtre, fermer la porte de la salle (bruit □)

2. Allumer le D8 (local R/16)

NB : vérifier régulièrement, sur le panneau, le débit de l'eau en sortie du filtre à particules.

- Allumer l'ordinateur et l'écran (ctrl+alt+delete) et rentrer le mot de passe (CLAY)
- Appuyer sur le bouton vert (noté1), à droite de l'appareil, pour allumer le diffractomètre
- Attendre que le voyant jaune busy s'éteigne
- Tourner la clé sur la position « I »
- Allumer le préchauffage en maintenant le bouton central appuyé jusqu'à ce que le voyant vert reste allumé
- Contrôler les paramètres en appuyant simultanément sur le bouton « mode » et sur la flèche
 - i. Tension en stand by 20kV
 - ii. Courant en stand by 5mA
 - iii. Débit d'eau au niveau de l'appareil (>3.5 1/min)
 - iv. Valeur courant au niveau du tube (1.9 A)
- Appuyer sur « on » (bouton à gauche)

3. Charger les échantillons

- Ouvrir les portes délicatement
- Mettre les échantillons (max.9)
 - i. Pousser sur le ressort
 - ii. Insérer l'échantillon
 - iii. Vérifier l'horizontalité du porte échantillon
- Fermer les 2 portes, vérifier que le voyant rouge « alarme » s'éteint, sinon vérifier la fermeture

4. Analyse en mode automatique

- Ouvrir dossier *Diffrac Plus Measurement*, ouvrir dossier *XRD Commander*, ouvrir la feuille *Joh* et créer un nouveau *Joh*
- Rentrer la liste des échantillons
 - i. Colonne « *Position* » position de l'échantillon (de 1 à l'avant à 9 à l'arrière)
 - ii. Colonne « Sample ID » : rentrer le nom de l'échantillon
 - iii. Colonne «*Parameter* » : sélection du fichier DQL approprié, chercher dans « disque D », DQL type NEW et choisir :
 - poudre rotation off.dql pour une poudre
 - *n paraphilips.dql* pour une lame naturelle
 - eg paraphilips.dql pour une lame saturée à l'éthylène glycol

- 500-li-k paraphilips.dql pour une lame passée au four
- iv. Colonne « Raw File » : copier et coller ce qui est indiqué dans la colonne « Sample ID »
- « Start » pour lancer la mesure, répondre « OK » au message qui s'affiche
- La feuille *Details* permet de visualiser ce que fait l'appareil et contrôler un éventuel problème
- La feuille *Jobs* permet de vérifier l'état d'avancement de l'analyse

loading: chargement de l'échantillon

suspend : analyse en attente finished : analyse terminée

- Ouvrir la feuille *Adjust* pour visualiser l'acquisition du spectre en cours
- Après la procédure, les fichiers.raw sont stockés sur le disque C sous le dossier diffdat1, ouvrir les fichiers sous Eva et vérifier que l'acquisition est complète
- Transférer les fichiers.raw dans le disque D sous le dossier concerné (e.g., Expertises, Projet ou Nom de l'utilisateur)
- Après la procédure l'appareil se remet automatiquement en stand by (20 kV, 5ma)

5. Eteindre le D8

<u>Note</u> : éteindre l'appareil si non utilisé pendant plusieurs jours et /ou risque d'orage ou de canicule

- Eteindre l'ordinateur et l'écran
- Enfoncer le bouton « off », attendre quelques instants
- Remettre la clé en position « 0 », attendre quelques instants
- Eteindre l'appareil en appuyant sur bouton rouge (noté 0), à droite de l'appareil

Attendre environ 10 minutes avant d'éteindre le système de circulation d'eau pour assurer le refroidissement du tube, fermer la vanne, mettre le système de circulation d'eau pour assurer le refroidissement du tube, fermer la vanne, mettre le système de refroidissement sur « 0 », remettre la housse de protection (poussières), refermer la fenêtre.

Site CW 52

Propriétés minéralogiques (analyse de l'argile totale)

1. SONDAGE N°1:

Profondeur [8.80 – 9.20m] : Argile marneuse, échantillon (code 9)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.8	20	64.07
d=3.34Å	Quartz	7.7	1	30.83
d=3.02Å	Calcite	0.5	1.65	3.28
d=3.46-3.52Å	Anhydrite	0.5	0.9	1.80

Profondeur [10.80 – 11.20m]: Argile marneuse, échantillon (code 8);

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.8	20	52.63
d=3.34Å	Quartz	9.2	1	30.26
d=3.02Å	Calcite	2.1	1.65	11.38
d=3.21 – 3.26Å	Feldspaths-K	0.3	4.3	4.24
d=3.46-3.52Å	Anhydrite	0.5	0.9	1.48

Profondeur [14.00 – 14.45m] : Argile marneuse, échantillon (**code 10**)

	oronatur [1 1100 1 11 10 m] (1 mgmt marmoust) tomanum (to at 10)				
Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif	
d=4.46Å	Argile totale	0.8	20	62.13	
d=3.34Å	Quartz	7.2	1	27.96	
d=3.02Å	Calcite	0.6	1.65	3.24	
d=3.21 – 3.26Å	Feldspaths-K	0.3	4.3	5.0	
d=3.46 – 3.52Å	Anhydrite	0.3	0.9	1.05	

2. SONDAGE N°2:

Profondeur [6.60 - 7.0m]: Argile sableuse (code 12)

	<u> </u>	, ,		
Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	1	20	63.18
d=3.34Å	Quartz	9.3	1	29.38
d=3.02Å	Calcite	1.1	1.65	5.73
d=3.46-3.52Å	Anhydrite	0.6	0.9	1.70

Profondeur [13.65 – 13.85m] : Argile sableuse (code 6)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	1.2	20	64.69
d=3.34Å	Quartz	8.1	1	21.83
d=3.02Å	Calcite	1.4	1.65	6.27
d=3.21-3.26Å	Feldspaths-K	0.5	4.3	5.79
d=3.46-3.52Å	Anhydrite	0.6	0.9	1.45

3. SONDAGE N°4:

Profondeur [3.0 - 3.40m]: Argile (code 7)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.8	20	49.90
d=3.34Å	Quartz	9.6	1	29.94
d=3.02Å	Calcite	2.6	1.65	13.38
d=3.21 – 3.26Å	Feldspaths-K	0.4	4.3	5.36
d=3.46 - 3.52Å	Anhydrite	0.5	0.9	1.40

Profondeur [7.50 – 8.0m] : Argile marneuse (code 2)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.9	20	53.22
d=3.34Å	Quartz	8.8	1	26.02
d=3.02Å	Calcite	3.2	1.65	15.61
d=3.21 – 3.26Å	Feldspaths-K	0.3	4.3	3.81
d=3.46 – 3.52Å	Anhydrite	0.5	0.9	1.33

Profondeur [10.00 - 10.50m]: marne noire (code11)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	2.4	20	60.89
d=3.34Å	Quartz	9.1	1	11.54
d=3.02Å	Calcite	10	1.65	20.93
d=3.21 – 3.26Å	Feldspaths-K	0.9	4.3	4.91
d=3.46-3.52Å	Anhydrite	1.5	0.9	1.71

4. SONDAGE N°5:

Profondeur [4.75 - 5.35m]: Argile (code 4)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.7	20	51.24
d=3.34Å	Quartz	8.5	1	31.11
d=3.02Å	Calcite	2.4	1.65	14.49
d=3.21 – 3.26Å	Feldspaths-K	0.2	4.3	3.15

5. SONDAGE N°6:

Profondeur [2.70 – 3.00m] : Argile (code 5)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	1	20	44.63
d=3.34Å	Quartz	8.7	1	19.41
d=3.02Å	Calcite	8.2	1.65	30.19
d=3.21 – 3.26Å	Feldspaths-K	0.6	4.3	5.75

Profondeur [7.80 - 8.20]: Argile, partie jaune (code 1)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	1.5	20	55.22
d=3.34Å	Quartz	8.3	1	15.28
d=3.02Å	Calcite	7.4	1.65	22.47
d=3.21-3.26Å	Feldspaths-K	0.7	4.3	5.54
d=3.46 - 3.52Å	Anhydrite	0.9	0.9	1.49

Profondeur [7.80 – 8.20]: Argile, partie grise (code 3)

Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.9	20	54.18
d=3.34Å	Quartz	8.6	1	25.88
d=3.02Å	Calcite	2.7	1.65	13.41
$d=3.21-3.26\text{\AA}$	Feldspaths-K	0.4	4.3	5.18
d=3.46 - 3.52Å	Anhydrite	0.5	0.9	1.35

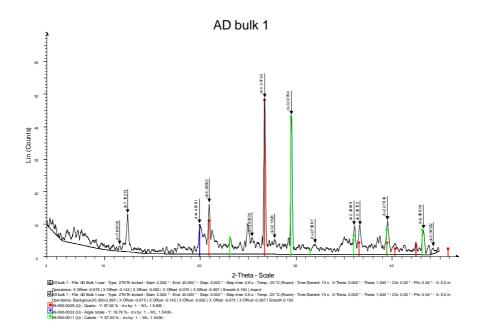
L'échantillon code 21 qui correspond au même du code 11

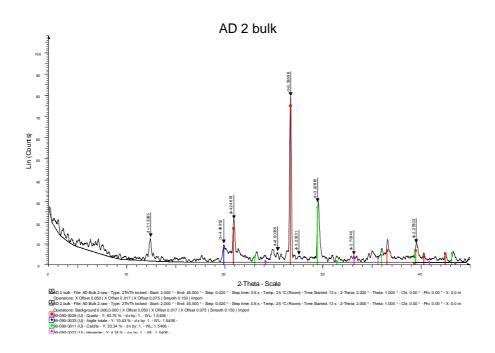
Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	1.1	20	51.13
d=3.34Å	Quartz	5.3	1	12.32
d=3.02Å	Calcite	7.7	1.65	29.51
d=3.21 – 3.26Å	Feldspaths-K	0.6	4.3	5.99
d=3.46-3.52Å	Anhydrite	0.5	0.9	1.04

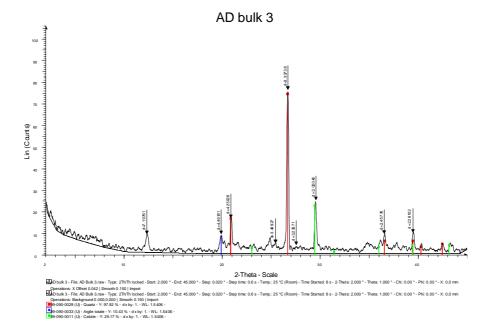
L'échantillon code 22 qui correspond au même du code 7

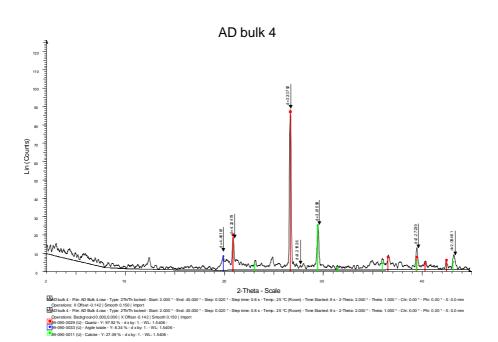
Poudre	Identification	Intensité	Facteur correctif	% relatif
d=4.46Å	Argile totale	0.8	20	51.66
d=3.34Å	Quartz	8.7	1	28.09
d=3.02Å	Calcite	2.8	1.65	14.92
d=3.21 – 3.26Å	Feldspaths-K	0.3	4.3	4.16
d=3.46 - 3.52Å	Anhydrite	0.4	0.9	1.16

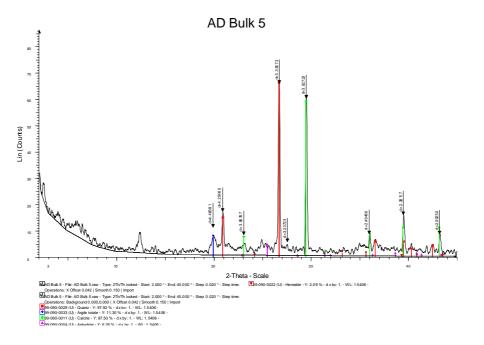
Propriétés minéralogiques (analyse de la fraction argileuse)

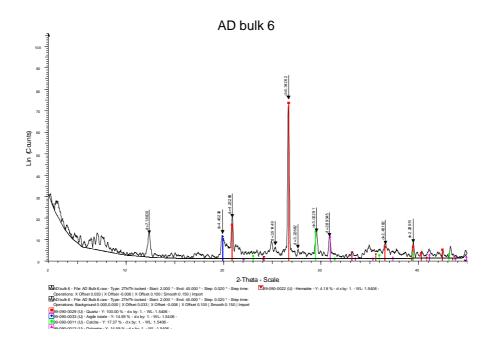


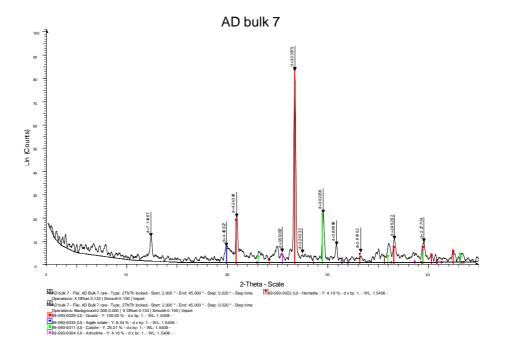


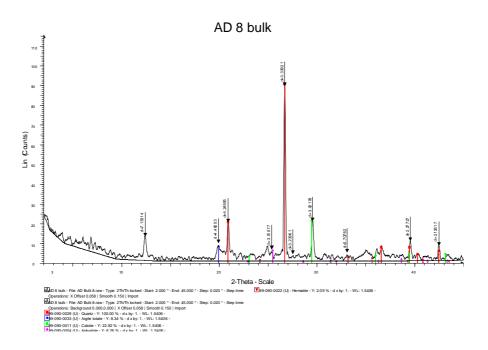


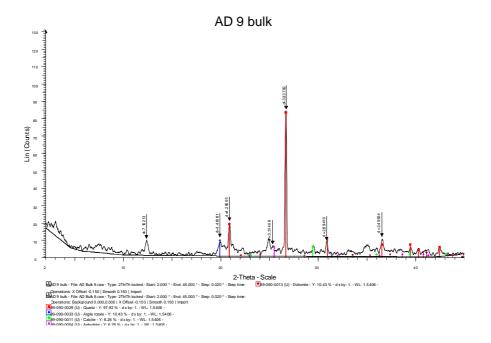


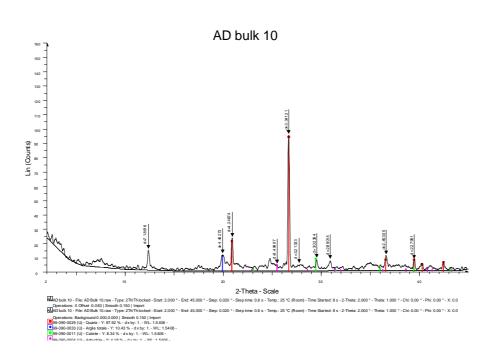


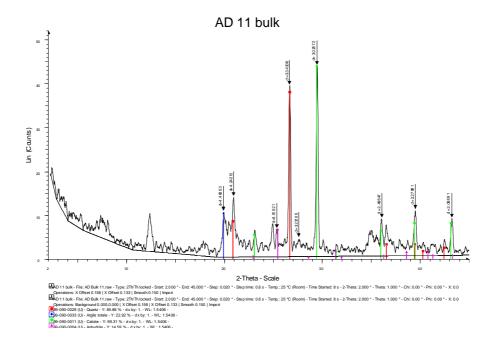


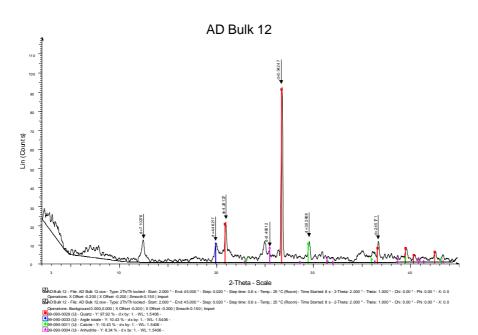


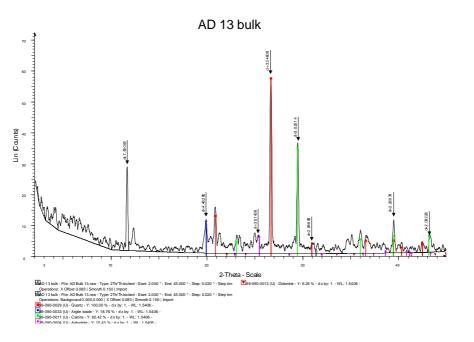


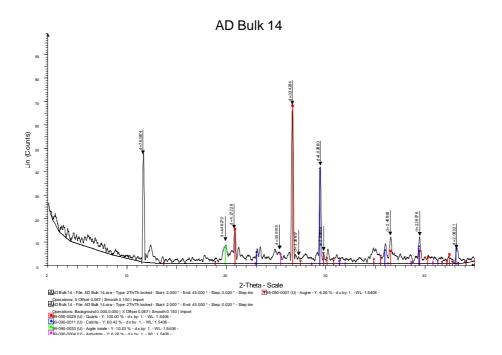


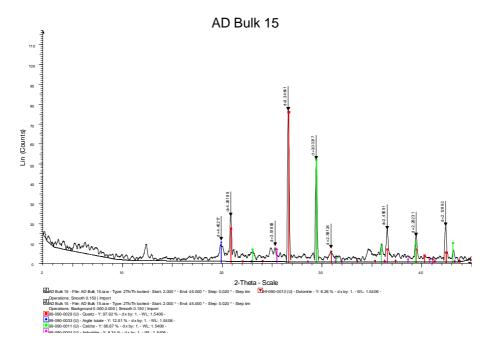


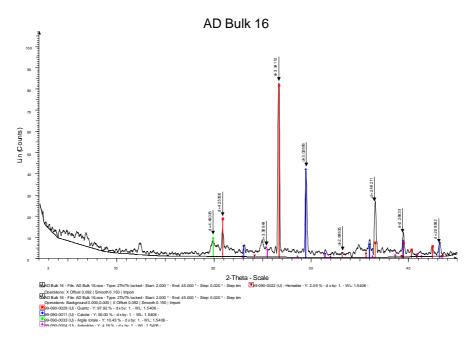


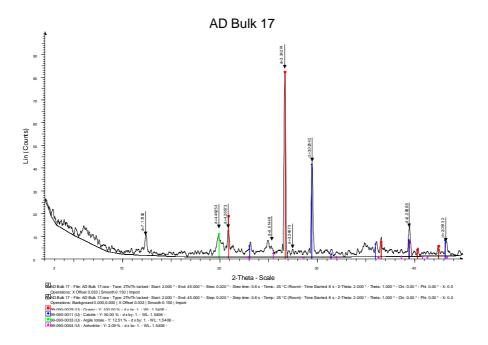


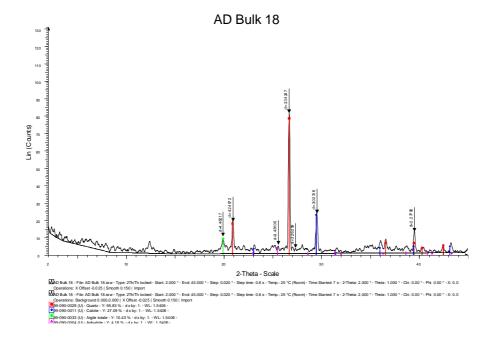


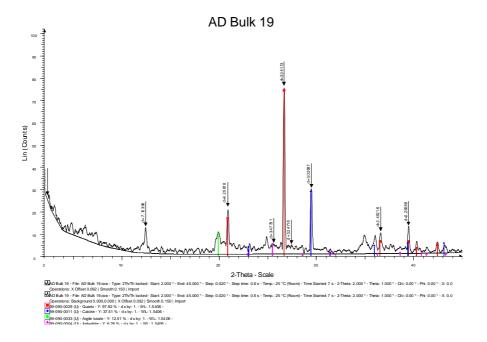


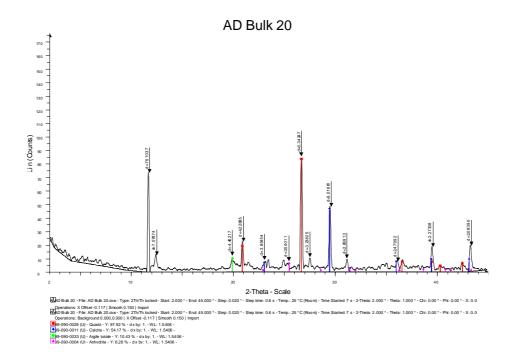


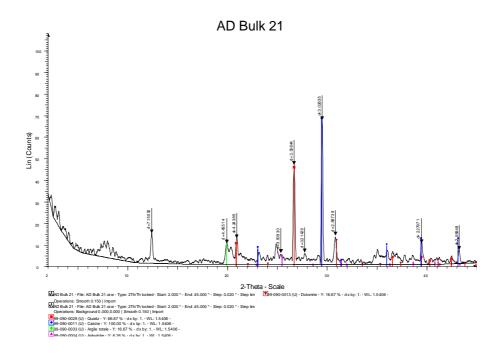


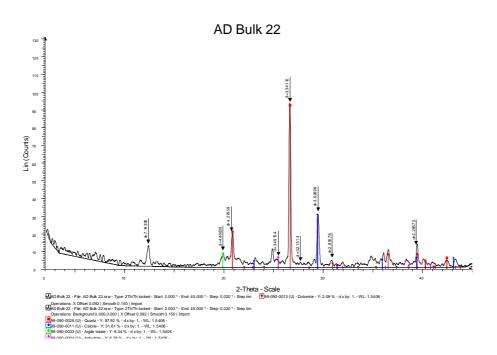










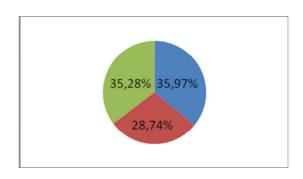


Minéraux de la fraction argileuse CW52

SONDAGE N°1

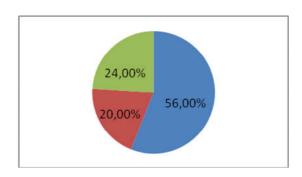
Code 9

kaolinite	35,97%
Vermiculite	28,74%
V-Cg	35,28%



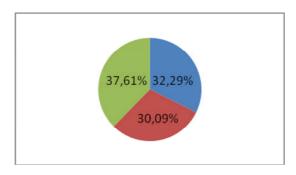
Code 8

kaolinite	56,00%
Vermiculite	20,00%
C-V	24,00%



Code 10

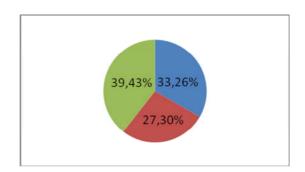
kaolinite	32,29%
Vermiculite	30,09%
V-Cg	37,61%



SONDAGE N°2

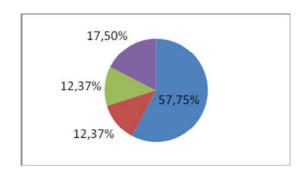
Code 12

000012	
kaolinite	33,26%
Vermiculite	27,30%
V-Cg	39,43%



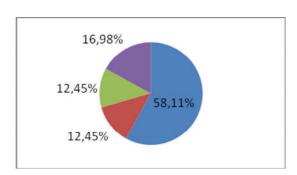
SONDAGE N° 4 Code 7

kaolinite	57,75%
vermiculite	12,37%
(I-V)	12,37%
Chlorite	17,50%



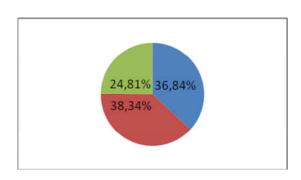
Code 2

00402	
kaolinite	58,11%
vermiculite	12,45%
(V-Cg)	12,45%
Chlorite	16.98%



Code 11

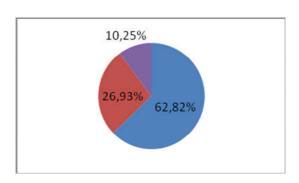
kaolinite	36,84%
Vermiculite	38,34%
C-V	24 81%



SONDAGE Nº 5

Code 4

kaolinite	62,82%
vermiculite	26,93%
Chlorite	10,25%

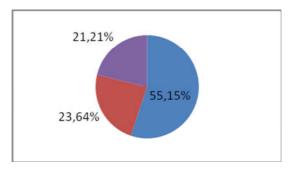


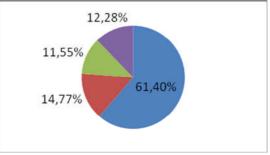
SONDAGE N°6 Code 5

kaolinite	55,15%
vermiculite	23,64%
(V-Cg)	0,00%
Chlorite	21,21%

Code 1

kaolinite	61,40%
vermiculite	14,77%
(V-Cg)	11,55%
Chlorite	12.28%





Etat de l'argile et conséquences sur le projet de construction 185 logements



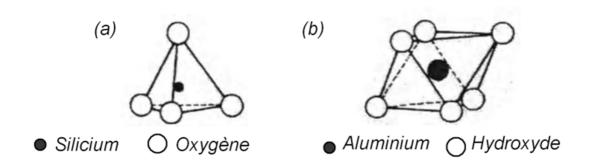




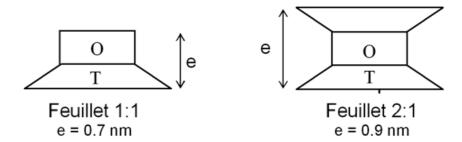


Microstructure de l'argile

Du point de vue minéralogique les argiles ont une structure feuilletée: ce sont des phyllosilicates. La plupart de ces minéraux ont une forme allongée et aplatie et ont de dimensions très variables. Il existe deux principales familles de structures unitaires, bases de la microstructure des argiles: l'unité structurale siliceuse ou tétraédrique et l'unité alumineuse ou octaédrique (Figure A3.1). L'unité tétraédrique est composée d'un atome de silice (Si4+) entouré par 4 atomes d'oxygène (O2-) équidistants de l'atome de silice. L'unité octaédrique est composée d'un atome d'aluminium (Al3+) ou parfois de magnésium (Mg2+) entouré par six groupes hydroxydes (OH-). Ces 2 structures minérales unitaires peuvent se combiner et former ainsi des feuillets d'argile. On distingue deux familles de feuillets d'argile : les feuillets 1:1 ou TO composés d'une couche tétraédrique T liée à une couche octaédrique O (structure dissymétrique typique des kaolinites, épaisseur moyenne 0.7 η m) et les feuillets 2:1 ou TOT composé d'une couche octaédrique entourée de deux couches tétraédriques (structure symétrique typique des illites et des smectites notamment, épaisseur moyenne 0.9 η m). Ces feuillets de base sont représentés sur la figure suivante sous leur forme symbolique.



Structure minérale de base des argiles: (a) structure tétraédrique (T)et (b) octaédrique (O).



Représentation symbolique des deux familles de minéraux argileux.

Structure globale

La structure générale d'une argile correspond à un empilement de feuillets qui forment ainsi une particule d'argile (on parle également de cristallites, de plaquettes ou d'amas de feuillets). La particularité d'une argile réside dans le nombre de couches empilées et donc dans l'épaisseur de la particule. La nature de ces empilements varie en fonction de divers paramètres : la présence de cations interfoliaires (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ le plus souvent), la nature des liaisons interfoliaires, l'orientation et l'arrangement des feuillets et la surface accessible à l'eau. Ces propriétés sont à la base d'une classification des argiles en cinq grandes familles:

les kaolinites

les illites,

les smectites (montmorillonite, vermiculite),

les chlorites,

les interstratifiés (empilement de feuillets ou de particules appartenant à des familles différentes).

Les liaisons entre minéraux argileux ne sont pas les seules à l'origine du comportement des roches argileuses pour lesquelles l'eau joue un rôle important. Il convient ainsi d'étudier les interactions « eau-argile » caractérisées par des liaisons susceptibles d'être à l'origine de phénomènes macroscopiques comme le gonflement ou le fluage des roches argileuses.

Système « eau-argile »

L'influence de l'eau sur le comportement des argiles est énorme. L'eau interstitielle et l'eau au contact d'échantillons saturés peuvent considérablement influencer le comportement mécanique des roches argileuses (Di Maio, 2004a, 2004b). L'étude de l'influence de la présence d'eau dans les roches argileuses consiste à considérer les paramètres suivants : la masse d'eau, la nature de l'eau (concentration, pH, nature des liens avec les particules solides) et la pression. Tout d'abord la structure chargée des particules d'argile permet d'identifier trois types de fixation des molécules dipolaires d'eau (Tarantino, 2005):

Les molécules d'eau peuvent être adsorbées sur la surface du feuillet par des liaisons hydrogènes, par adsorption polaire et par des forces de Van der Waals. Ces molécules d'eau forment une couche d'eau dite adsorbée (molécules d'eau fortement liées).

Les molécules d'eau peuvent se fixer à l'intérieur de la particule c'est-à-dire dans l'espace interfoliaire. Lorsque ce mécanisme ce produit (cela dépend de la nature des cations interfoliaires qui peuvent être des sites hydrophiles ou hydrophobes) le volume du feuillet augmente et l'on observe du gonflement dit gonflement interfoliaire ou intraparticulaire. C'est le cas des smectites qui ont une capacité de rétention d'eau cinq fois plus importante que les kaolinites. La théorie qui permet de décrire ce mécanisme est la théorie de la double couche diffuse décrite ci-dessous. Cette eau ne peut être évacuée sans déstructurer la roche.

Les molécules d'eau peuvent se fixer entre les particules par effet osmotique: la concentration de cation à mi-distance entre deux particules est plus importante que celle dans l'eau libre. Cette eau peut-être aussi considérée comme adsorbée.

Enfin l'eau libre, aboutissant au gonflement interparticulaire.

Echange d'ions:

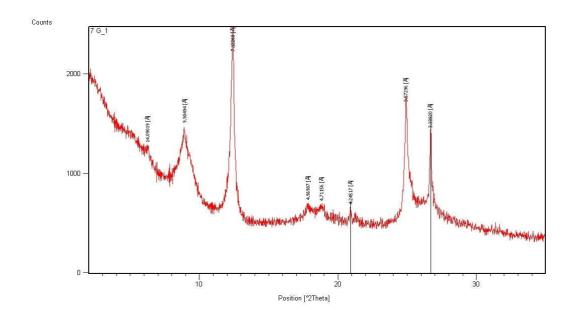
Les ions de l'espace interfoliaire (charge permanente et complexes de sphère intérieure) et les complexes de sphères externes sont dit échangeables puisque un ion peut facilement être remplacé par un autre (avec un ion d'égale valence ou deux de valence moitié). Ce processus est appelée échange d'ions et particulièrement échange de cation. Puisqu'il s'agit généralement d'ions chargés positivement qui équilibrent la surface de la particule chargée négativement. La capacité maximale d'échange de cations est dite « capacité d'échange cationique » (CEC). Ce paramètre qui nous renseigne de la quantité de cations échangeables, exprimé comme la somme des charges de ces cations. Des valeurs typiques de CEC pour les différents minéraux argileux sont illustrées sur le tableau suivant :

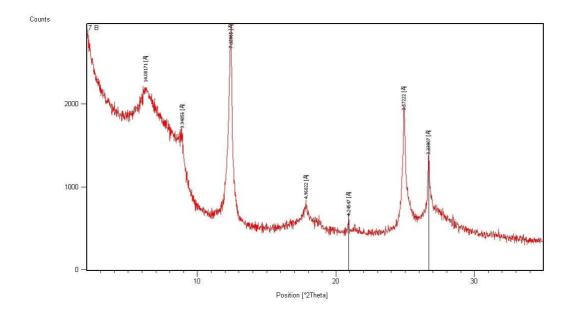
Annexe

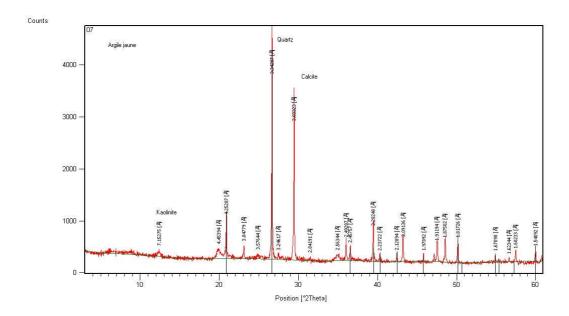
Minéral argileux	CEC [cmol ⁺ kg ⁻¹]	Surface de charge
Kaolinite	3-15	dépendant du pH
Chlorite	10-40	dépendant du pH
Illite	10-40	dépendant du pH
MO	150-300	Substitution isomorphe
Montmorillonite	80-120	Substitution isomorphe
smectite	80-150	Substitution isomorphe

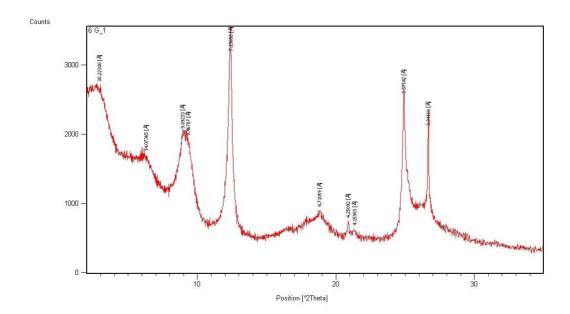
Valeurs typiques de la CEC des divers minéraux argileux et de la matière organique (Eslinger et Peaver, 1988)

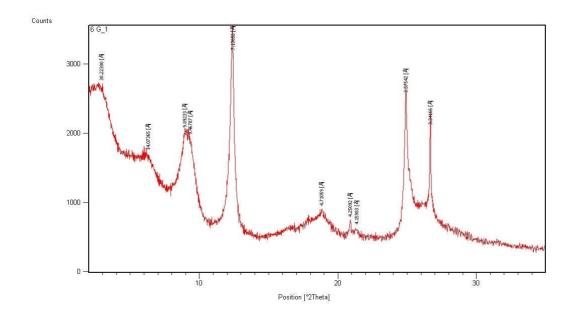
Diffractogrammes des rayons X du Site 185 logements

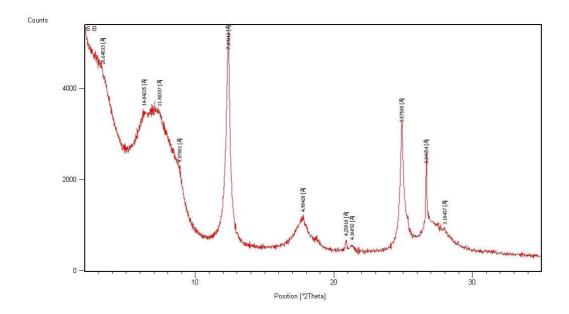


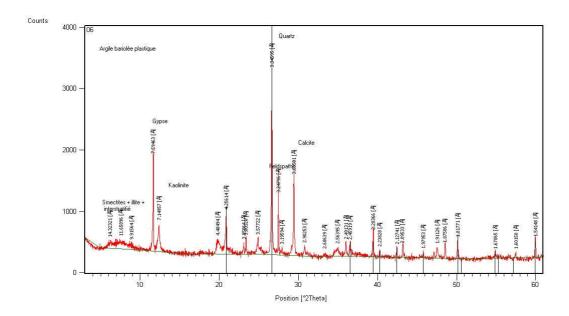


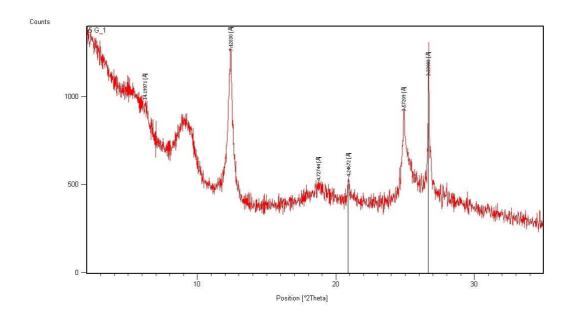


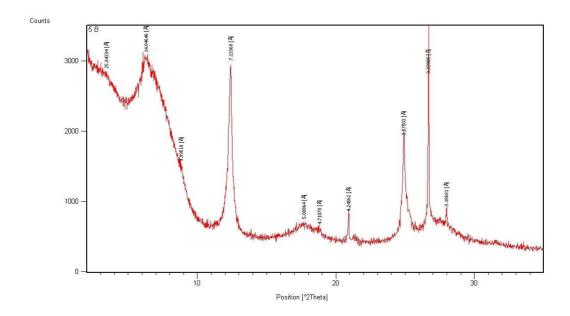


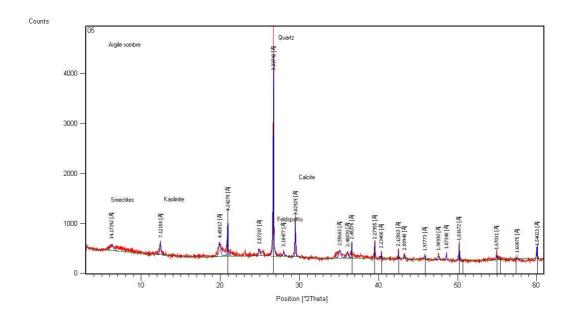


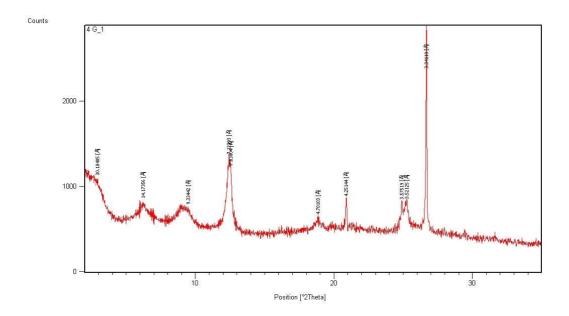


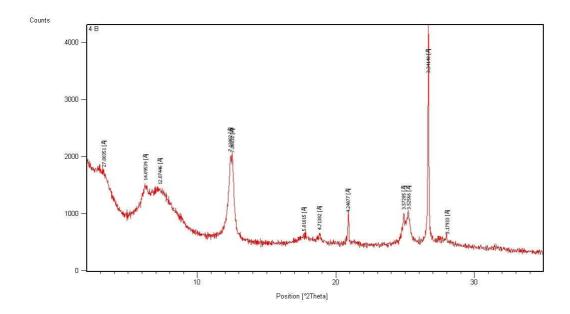


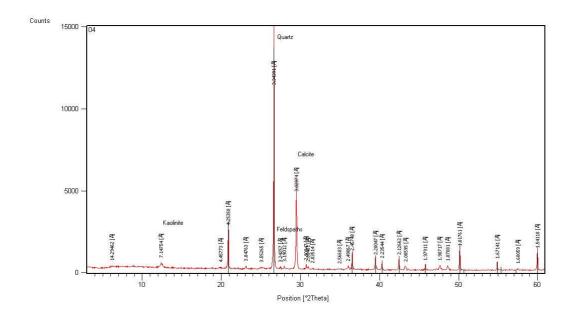


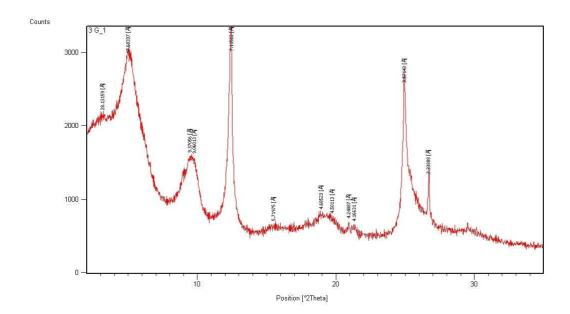


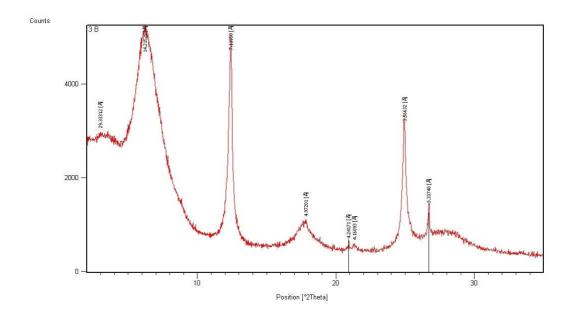


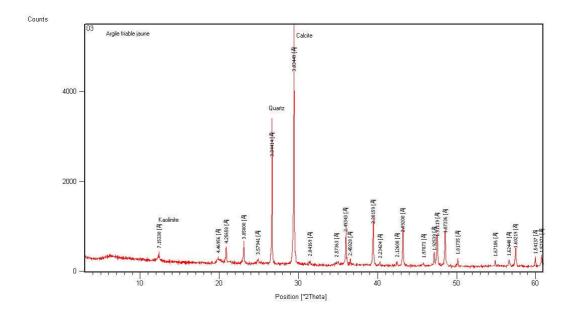


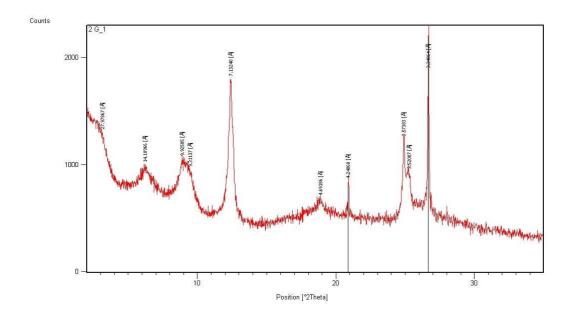


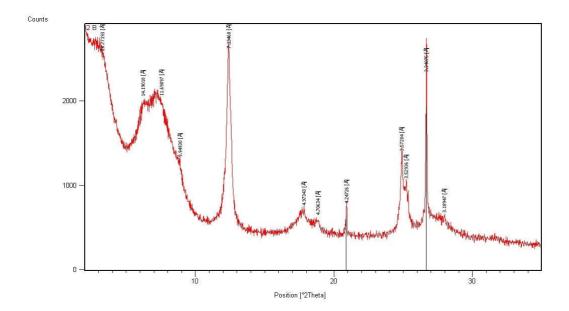


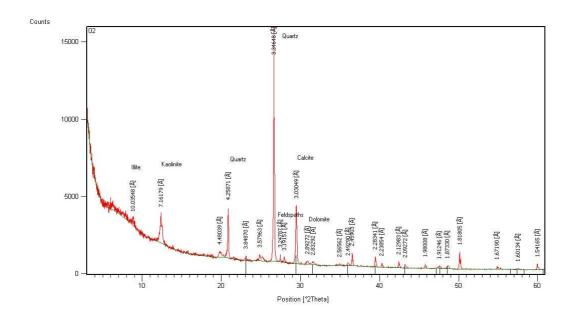


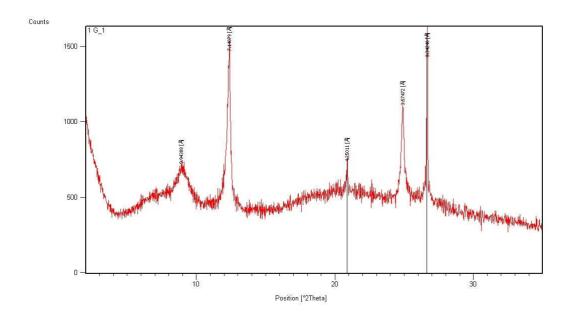


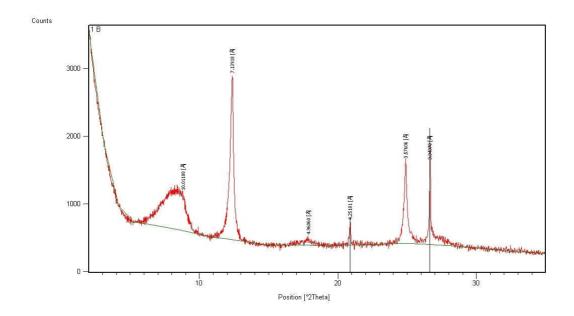


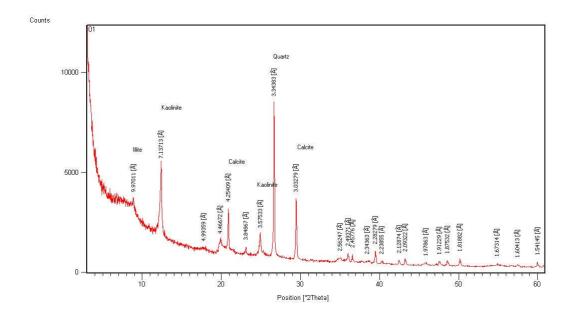












Indice de révision

Reconnaissance géotechnique CW 02 MILA

Log de Sondage N°: SC 1 - 10+000 ETUDE : Etude géotechnique : 13 glissements de terrains - CW 02 BOUE DE FORAGE : LIEU: TASSALA - MILA PROFONDEUR TOTALE: 12 ML TYPE FORAGE: CLIENT: GEOCONSEIL engineering $COORDONNEES: X \approx Y =$ TYPE DE MACHINE : $Z \approx$ DATE DEBUT: JANVIER / 2006 Diamètre extérieur du forage: mm DATE FIN : JANVIER / 2006 Diamètre extérieur du carottier (SC): mm Diamètre extérieur du carottier (MZ): mm Diamètre extérieur du carottier (SPT): mm NIVEAU NAPPE: 2,60 m Diamètre extérieur du carottier (DC): mm Diamètre extérieur du carottier (SH): mm Echant Profond Ech (m) γ_d Wn Cu ٩p Récupération DESCRIPTION Prof (m)% Remblais et cailloux - graviers enrobés dans une matrice limoneuse marron 1 foncé - humide ^{,50} roile noirâtre - brunâtre oxydé peu compacte bariolée de marne argileuse schistosée légerement graveleuse, _plastique et humide_ Alluvions dans une matrice fine friable Argile mameuse schistosée marron à noirâtre renfermant des fragments de marnes tendres enrobant des galets, des cailloux et des blocs arrondis, trés humide . Mame schisteuse noirâtre avec des passées sableux, caillouteux, graveleux trés humide, trés plastique 10 11 Mame (Schiste) grisâtre saine et dure 12 13 14 15 16 17 18 19 20 GEOCONSEIL engineering Etabli le JANVIER / 2006 Révisé le GEOCONSEIL

Log de Sondage N° : SC 2 - 14+600

ETUDE : Etude géotechnique : 13 glissements de terrains - CW02 LIEU : TASSALA - MILA PROFONDEUR

PROFONDEUR TOTALE : 15 ML

BOUE DE FORAGE : TYPE FORAGE :

 $\pmb{CLIENT: GEOCONSEIL \ engineering}$

COORDONNEES: X = Y =

Z =

TYPE DE MACHINE :

DATE DEBUT: JANVIER / 2006 DATE FIN:

NIVEAU NAPPE: 0,40 m

Diamètre extérieur du carottier (SC): mm Diamètre extérieur du carottier (SPT): mm Diamètre extérieur du carottier (SH): mm Diamètre extérieur du forage : mm Diamètre extérieur du carottier (MZ): mm Diamètre extérieur du carottier (DC) : mm

Prof (m)	Récupération	S.P.T	R.Q.D	⊕ Tub	ø Trou	Ehant	Profond Ech (m)		DESCRIPTION	q թ Bar	γ _d T/m³	I _P	Class. LPC
1								2000	Passages de cailloux et galets à matrice fine				
2 -									Argile marneuse altérée , bariolée de couleur marron - gris ,état friable				
3 4 5 6 7 7									Marne schisteuse altérée , renfermant des galets cm et dm , couleur brunâtre à grisâtre , état compacte				
9 10 11 12 13									Marne schisteuse altérée ,fracturée de couleur grisâtre intercalée de petits bancs de calcaire quartziques				
16													

Etabli le AL ARDH	Bureau d' Etudes Techniques et Laboratoires " AL ARDH "	
Révisé le		
Indice de révision		

Indice de révision

Log de Sondage N°: SC 3: 17+000 TUDE : Etude géotechnique: 13 glissements de terrain - CW 02 - 17+000 BOUE DE FORAGE : LIEU : TASSALA - MILA PROFONDEUR TOTALE: 15 ML TYPE FORAGE: CLIENT: GEOCONSEIL engineering COORDONNEES: X = Y = Z =TYPE DE MACHINE : DATE DEBUT: Janvier 2006 Diamètre extérieur du forage : mm Diamètre extérieur du carottier (SC): mm DATE FIN : Diamètre extérieur du carottier (SPT): mm Diamètre extérieur du carottier (MZ): mm NIVEAU NAPPE: 1,80 m Diamètre extérieur du carottier (SH): mm Diamètre extérieur du carottier (DC): mm Coupe Ech (m) R.Q.D ø Trou S.P.T Ϋ́d Cu $\mathbf{q}_{\mathbf{p}}$ Récupération DESCRIPTION (m) % T/m Remblais 1 3 Argile marneuse alterée bariolée, de couleur grisâtre; avec passage de galets cm et dm, etat friable 10 Marne argileuse schisteuse de couleur grisâtre, feuilletée, alterée, friable; renfermant des galets et blocs anguleux 12 13 14 15 16 17 18 19 20 Etabli le AL ARDH Bureau d'Etudes Techniques et Laboratoires "AL ARDH" Révisé le

Log de Sondage N°: SC 4 - 21+000 ETUDE: Etude géotechnique: 13 glissements de terrain - CW 02 BOUE DE FORAGE : PROFONDEUR TOTALE: 15 ML **LIE**U : Tassala- Mila COORDONNEES: X = Y = TYPE FORAGE: CLIENT: GEOCONSEIL engineering TYPE DE MACHINE : DATE DEBUT: Janvier 2006 Diamètre extérieur du carottier (SC): mm Diamètre extérieur du forage: mm DATE FIN : Diamètre extérieur du carottier (SPT): mm Diamètre extérieur du carottier (MZ): mm MIVEAU NAPPE: 0,80 m Diamètre extérieur du carottier (SH): mm Diamètre extérieur du carottier (DC): mm Coupe Echant Profond Ech (m) ₽ Trou γ_d ⊕ Tub Cu $\mathbf{q}_{\mathbf{p}}$ Récupération DESCRIPTION (m) Bar % T/m Remblais et mortiers Argile graveleuse de couleur maron noirâtre avec présence de cailloux et blocs de quartz 2 3 Argile marron à noire bariolée de marne, à matrice caillouteuse, renfermant des galets cm et dm; avec des blocs quartziques - Etat friable - hum 5 ailloux et galets à matrice argileuse 10 Marne schisteuse de couleur marron grisâtre renfermant des fragments de 11 schistes tendres et blocs anguleux 12 13 14 15 15,00 16 17 18 19 20 Etabli le AL ARDH Bureau d' Etudes Techniques et Laboratoires " AL ARDH " indice de révision

Sondage N°		01	01	01
Profondeur (m)		1.0	2.50	7.50
		1.50	3.00	8.00
Nature apparente des sols échantillonnés				
Classification géo	_			
Teneur en eau naturelle : W%		30.5	33.6	17.71
Densité sèche : γh (t / m³)		1.48	1.36	1.78
Densité humide : $\gamma h (t / m^3)$		1.93	1.82	2.09
Degré de saturation : Sr %		100	92	94.77
Poids spécifique : γs (t / m³)				
Granulométrie %de passant à	2 mm 0.40 0.08	99	99.3	100
Limites d'Atterberg %	Liquidité : W1 Plasticité :	69	82	61.5
	Ip	39	49	32.80
Indice de consistance : IC				
Teneur en matière organique (mg / g)				
Caractéristiques Oedométriques	Pc (bars) Cc (%) Cg (%)	1.23 0.280 0.076	1.02 0.292 0.076	2.15 0.180 0.060
Coefficient de perméabilité K (cm ² /s)		0.070	0,0,0	
Compression sim Rc (bars)	-			
Ecrasement (bars)				
Cisaillement rectiligne	C (bars) Φ (degré)	0.06 4	0.30	0.04 3.0
Cisaillement C (bars) triaxial Φ (degré)				
Bleu de methyléne 0/400				
Essais chimiques	Carbonates %	39.00	38.30	39.0
	Insolubles %			
	Gypses %			

Localisation: 14+600 - Tassala- Mila

Sondage N°		02	02	02
Profondeur (m)		1.50	6.50	11.00
		2.50	7.00	11.50
Nature apparen	te des sols	_,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,		
échantillonnés	1 1			
Classification géotechnique				
	Teneur en eau naturelle : W%		20.64	_
Densité sèche :		22.69 1.63	1.71	_
$\gamma h (t/m^3)$		1.03	1.71	
Densité humide :		2.00	2.05	_
$\gamma h (t/m^3)$				
Degré de saturation : Sr %		92.67	99.88	-
Poids spécifique :				
$\gamma s (t/m^3)$				
Granulométrie	2 mm		97	96
%de passant	0.40			
à	0.08			
Limites	Liquidité :		65.12	61.36
d'Atterberg %	\mathbf{W}_{1}			
	Plasticité :			
	\mathbf{I}_{p}		41.8	32.75
Indian de consiste	Indice de consistance : IC			
	1			
Teneur en matiére	e organique			
(mg / g) Caractéristiques	Pc (bars)	2.30	1.07	
Oedométriques	Cc (%)	0.198	0.225	-
ocdometriques	Cg (%)			-
C CC: 1		0.084	0.075	-
Coefficient de perméabilité				
K (cm ² / s) Compression simple:				
Rc (bars)	pic.			
Ecrasement (bars	()			
Cisaillement	C (bars)	0.35	0.20	0.23
rectiligne	Φ (degré)	12	3	18.0
		12	3	10.0
Cisaillement triaxial	C (bars) Φ (degré)			
Bleu de me				
0/40	•			
Essais Carbonates %		8.0	8.4	
chimiques		0.21	0.20	
	nsolubles %	V•#I	J.20	
		0.44	0.42	
Gypses %		V.44	0.42	