

Université de Saida– Dr. Moulay Tahar
Faculté de Technologie

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat 3^{ième} Cycle

Spécialité : Réseaux et ouvrages hydrauliques

Filière : Génie Civil

Par :

RAHMANI Asmaa

Thème :

Rhéologie d'une suspension solide-solide / solide-liquide à base de loess en vue de l'obtention d'un nouveau matériau



Thèse soutenue le 26/06/2021 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	DERRAS Boumediene	Prof.	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Président
02	HAZZAB Abdelkrim	Prof.	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Rapporteur
03	KORICHI Khaled	M.C.A	Université de Sidi Bel Abbes	Examineur
04	BOUGUENINA Otbi	M.C.A	Centre Universitaire El Bayadh	Examineur
05	REZGANI Laid	M.C.A	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Examineur
06	DERFOUF Feth-Ellah Mounir	M.C.A	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Examineur

دراسة ريولوجية لمعلقات اساسها تربة اللوس بهدف تطوير خصائصها والحصول على مادة جديدة

ملخص موسع:

اللوس هي تربة قابلة للانهييار، تصبح عرضة للانهييار والتشوه بعد الاضطرابات كالتحميل والترطيب، مسببة في ذلك مخاطر وأضرار جسيمة للهياكل المبنية عليها. يعد تحسين استقرار وقوة اللوس ضروريًا لتلبية الاحتياجات الهندسية في مجال الهندسة المدنية. هناك العديد من التقنيات لتحسين خصائص التربة القابلة للطي. تعتمد إحدى طرق التثبيت الأكثر شيوعًا على إضافة مواد معينة، يتم اختيارها على أساس قدراتها الفيزيائية والكيميائية.

وفي هذا الإطار، حددت أهداف هذه الأطروحة إلى التعرف على تربة اللوس الجزائري من وجهة نظر جيوتقنية كعينة من اللوس الصحراوي في شمال إفريقيا. تعتبر هذه الدراسة مساهمة تهدف إلى إنشاء قاعدة بيانات للمعرفة العلمية حول إيداع اللوس الصحراوي في الجزائر. وتشمل عملية تحديد الخصائص الجيوتقني على عدة اختبارات فيزيائية، كيميائية وميكانيكية.

من ناحية أخرى، تمتد أعمال هذه الأطروحة لتشمل دراسة ريولوجية كخاصية نوعية لهذه التربة. تعتبر الريولوجيا أحد أهم مجالات البحث الرئيسية في مثل هذه المجالات، إذ توفر هذه التقنية فهماً أفضل لسلوك البنية المجهرية للتربة عند تعرضها لضغوط خارجية. تم استخدام التوصيف الريولوجي للمعلقات لتقييم حساسية الروابط والمقاومة الهيكلية لجزيئات التربة جراء التأثيرات الكيميائية والميكانيكية. وعليه كان من الضروري تقدير وبدلالة عتبة التدفق، القوة القصوى التي يمكن أن تتحملها التربة بعد تعرضها لتأثير ضغط خارجي معين. يهدف هذا العمل أساساً، إلى استكشاف تحسين الخصائص الفيزيائية-الكيميائية والريولوجية لتربة اللوس الجزائري من خلال إدخال بعض المواد الإضافية. تتمثل هذه المواد في طين البنتونيت ومادة الجير.

من خلال تحليل نتائج سلوك تدفق خليط تربة اللوس واللزوجة وتطور المعلمات الريولوجية، تم إدراك وتأكيد أساس متطلبات تحسين خصائص المقاومة للمخاليط "اللوس-البنتونيت" و "اللوس-الجير". تم تحليل القياسات الانسيابية لتدفق المعلقات بواسطة نموذج رياضي متمثل في نموذج 'هرشل-بالكلي'. بالإضافة إلى هذا، تم فحص الحساسية الفيزيائية لتربة اللوس من خلال توزيع حجم الحبيبات وخصائص اللدونة. بالإضافة، كما تم استخدام الرقم الهيدروجيني والتوصيل الكهربائي للمخاليط لاستكشاف التغيرات الهيكلية.

سمحت نتائج الاختبارات الجيوتقنية بالتصنيف حسب منطقة أخذ العينات. وأظهرت نتائج دراسة المقارنة إلى القول بأن خصائص اللوس الجزائري مشابهة لتلك الموجودة في العديد من مناطق العالم، لاسيما مناطق جنوب تونس. وفي إطار الاختبارات الفيزيائية خلصت نتائج دراسة تأثير المواد المضافة على أن إدخال البنتونيت ومادة الجير يسبب تغييراً في نسيج تربة اللوس ويحسن من لدونة المخاليط. ومن خلال استكشاف التغيرات في الرقم الهيدروجيني والتوصيل الكهربائي، أظهرت نتائج الفحص الكيميائي تعديلات هيكلية بيئة للمخاليط المدروسة.

بالمقابل، أظهرت نتائج الاختبارات الريولوجية أن زيادة تركيز المواد المضافة (البنتونيت أو الجير) يحسن من القوة الميكانيكية ويزيد من عتبة التدفق ومعامل الاتساق ولزوجة المعلقات المرتبطة بالخصائص الريولوجية للتربة الأصلية. يتم تفسير هذه التغيرات من خلال وجود تفاعلات إسمنتية بين جزيئات المخاليط. هذه التفاعلات ناتجة عن الترطيب، التكتل والتلبد بين الجسيمات الناجمة عن المواد المضافة.

خلصت النتائج التجريبية إلى أن البنتونيت ومادة الجير يمثلان وسيلة تثبيت واستقرار فعالة لتحسين الأداء ضد انهيار تربة اللوس وزيادة مقاومته للصدمات الميكانيكية. يمكن أن توفر هذه النتائج قاعدة بيانات عمل جيوتقني وريولوجي للتحكم في الانهييار ومعالجته في المنطقة المدروسة. وبالتالي يمكن استخدام البيانات الفنية المتعلقة باللوس في الهندسة المدنية والأشغال العمومية والهيدروليكا، بالإضافة إلى تصنيع مواد البناء.

كلمات مفتاحية: تربة اللوس، الخصائص الفيزيائية-الكيميائية، الريولوجيا، البنتونيت، الجير، استقرار.

Rhéologie d'une suspension solide/solide – solide/liquide à base de loess en vue l'obtention d'un nouveau matériau

Résumé élargi:

Le loess est un sol effondrable. Il est susceptible de s'effondrer et de se déformer après les perturbations, y compris le chargement et le mouillage. Cela peut causer des dommages importants aux structures construites. L'amélioration de la stabilité et de la résistance du loess est nécessaire pour répondre aux besoins d'ingénierie. Dans le domaine du génie civil, pour améliorer les propriétés des sols effondrables, il existe de nombreuses techniques. L'une des méthodes de stabilisation les plus courantes, repose sur l'ajout de certains additifs, en l'occurrence divers liants et matériaux sélectionnés pour leurs capacités physico-chimiques.

La présente thèse a pour but, d'une part, d'identifier le loess Algérien comme un échantillon du loess désertique de l'Afrique du Nord, du point de vue géotechnique. Il s'agit d'une contribution qui a pour objet de mettre en place une banque de données et de connaissances scientifiques sur le gisement du loess saharien en Algérie. L'identification comprend plusieurs paramètres physico-chimiques et mécaniques.

D'une d'autre part, l'étude s'étend pour étudier les propriétés rhéologiques de ce matériau. La rhéologie comme discipline d'exploration offre une meilleure compréhension du comportement de la microstructure du sol lorsqu'il est soumis aux contraintes externes. La caractérisation rhéologique des suspensions est utilisée pour évaluer la sensibilité des liaisons et la résistance structurelle des particules de sol aux effets chimiques et aux impacts mécaniques. Aussi, il est important donc d'estimer la force maximale, liée au seuil d'écoulement, qui peut être supportée par le matériau après avoir été soumis à un cisaillement donnée.

Un des objectifs fondamentaux de ce travail est d'explorer l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques et rhéologiques du loess Algérien, grâce à l'ajout de certains additifs. Le choix des additifs s'est fixé sur la bentonite et la chaux. En analysant les résultats de comportement en écoulement des suspensions, la viscosité et l'évolution des paramètres rhéologiques, les exigences d'amélioration des caractéristiques de résistance des mélanges loess-bentonite et loess-chaux sont perçues et confirmées. Les mesures rhéologiques de l'écoulement des suspensions sont analysées à travers le modèle d'Herschel-Bulkley. Quant à la sensibilité physique du loess, elle est examinée à travers l'analyse de la distribution granulométrique et l'étude des propriétés de plasticité. En revanche, le pH et la conductivité électrique des mélanges sont utilisées pour explorer les modifications structurelles.

Les résultats des essais géotechniques sont permis une classification selon la région d'échantillonnage. L'étude comparative indique que le loess Algérien possède des similitudes avec le loess de nombreuses régions du monde, en particulier, le loess du sud Tunisien.

Les résultats de l'effet des additifs sur les tests physiques montrent que l'introduction de la bentonite et la chaux entraînent une modification de la texture du loess et améliore la plasticité des mélanges. L'examen chimique, par exploration des variations du pH et de la conductivité électrique, révèle des modifications structurelles des mélanges étudiés.

Les résultats des tests rhéologiques montrent que l'accroissement de la concentration de l'additif (Bentonite ou chaux) améliore la résistance mécanique et augmente le seuil d'écoulement, la consistance ainsi que la viscosité des suspensions. L'augmentation de ces paramètres s'explique par la création

d'interactions cimentaires entre les particules du mélange. Ces interactions sont favorisées par l'hydratation, l'agglomération et la floculation inter-particules, induites par les additifs.

Les résultats expérimentaux ont conclu que la bentonite et la chaux peuvent représenter un moyen efficace de stabilisation pour améliorer les performances contre l'effondrement du loess et augmenter sa résistance aux chocs mécaniques. Ces résultats peuvent fournir ainsi une base de données aux travaux géotechniques et rhéologiques permettant de lutter contre l'effondrement dans la région d'étude. Les données techniques liées au loess peuvent ainsi être utiles dans les domaines ; du génie civil, des travaux publics, de l'hydraulique et éventuellement dans la fabrication de matériaux de construction.

Mots clés : Bentonite, Chaux, Loess, Propriétés physico-chimiques, Rhéologie, Stabilisation.

Rheology of solid/solid and solid/liquid loess-based suspension for obtaining a new material

Extended abstract:

Loess is collapsible soil. It is susceptible to collapse and deformation due to disturbances such as loading and wetting. It can cause significant damage to structures built on it. Improvement in the stability and strength performance of loess is necessary to meet engineering needs. In the field of civil engineering, many techniques are used to improve the collapsible soils properties. One of the most common stabilization methods relies on the addition of certain additives selected for their physical and chemical capabilities.

This thesis aims, on the one hand, to identify from a geotechnical viewpoint the Algerian loess as a sample of desert loess in North Africa. It represents a complementary contribution that aims to create a scientific knowledge databank on desert loess deposits in Algeria. The geotechnical identification included several physical-chemical and mechanical tests.

On the other hand, the study extends to investigate the rheological properties of this material. Rheology, as an exploration discipline, provides a better understanding of the soil microstructure behavior when it subjected to external stresses. The rheological characterization of the suspensions was, therefore, used to assess the sensitivity of the bonds and the structural resistance of soil particles to chemical effects and mechanical impacts. It is, therefore, important to estimate the maximum force, related to the yield point, which can be supported by the material after being subjected to a given shear.

One of the main objectives of this study is to explore the improvement of physical-chemical and rheological characteristics of Algerian loess by adding certain additives. The choice of the additives was fixed on bentonite clay and lime. By analyzing the suspensions flow behavior results, the viscosity, and the evolution of the rheological parameters, the improvements needed in terms of the resistance characteristics of the 'loess-bentonite' and 'loess-lime' mixtures were evaluated and confirmed. The flow rheological measurements of the suspensions were analyzed by the Herschel-Bulkley model. The loess physical sensitivity was examined through grain-size distribution and plasticity properties. The pH and electrical conductivity of the mixtures were also used to explore structural change.

The geotechnical test results allowed classification according to the sampling area. In conclusion, the comparative study indicated that Algerian loess is comparable to those from many parts of the world, in particular, that of southern Tunisia.

Physical test results showed that the introduction of bentonite and lime changed the loess texture and improved the plasticity of mixtures. Chemical examination via the change in pH and electrical conductivity revealed the structural changes in the mixtures studied.

Rheological test results showed that increasing concentrations of additives improves the mechanical strength and increased the yield stress, consistency, and viscosity of the suspensions. The creation of cementitious interactions between mixture particles explained the increase in those parameters. Hydration, agglomeration, and inter-particle flocculation induced by the additives promoted these interactions.

The experimental results led to the conclusion that bentonite and lime may represent an effective means to improve the performance in terms of preventing loess collapse and increasing its resistance to mechanical impact. These results may thus provide a geotechnical and rheological working database for the control and treatment of loess collapse and landslides in the region under study. Technical data related to loess may, therefore, be beneficial in terms of civil engineering, public works, hydraulics, and the manufacture of construction materials.

Key words : Bentonite, Lime, Loess, Physical-chemical properties, Rheology, Stabilization.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de thèse Mr. Abdelkrim HAZZAB, Professeur à l'Université Dr. Tahar MOULAY de Saida, qui a été mon guide sur le sentier de la recherche et m'a toujours soutenu et encouragé durant la durée de ma thèse. Je le remercie chaleureusement pour tout ce que j'ai appris avec lui durant ce travail.

Je remercie tout particulièrement Mr. Hadj AIMER Maître assistant à l'Université de Saida qui m'a accompagné depuis le début de ce travail. Je le remercie pour sa disponibilité, ses conseils, sa générosité, et son aide à réaliser ce travail.

Je suis très reconnaissant envers Mr. Boumediene DERRAS, Professeur à l'Université Dr. MOULAY Tahar de Saida, d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Je remercie vivement, pour l'honneur qu'ils me font, les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer le travail de ma thèse:

- Mr. KORICHI Khaled, Maître de Conférences à l'université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès.
- Mr. BOUGUENINA Otbi, Maître de Conférences au Centre Universitaire El Bayadh.
- Mr. REZGANI Laid et Mr. DERFOUF Feth-Ellah Mounir, Maîtres de Conférences à l'université de Saida.

Ma gratitude s'adresse également à Mr. Abdellah GHENAIM et Mr. Karim BEKKOUR pour m'avoir permis de réaliser les tests rhéologiques au sein de l'Institut de Mécanique des Fluides et des Solides (IMFS) – Université de Strasbourg, France.

J'adresse tous mes remerciements à Mr. Abdenaceur AIMEUR, directeur technique du Laboratoire des Travaux Publics de Sud (LTPS) de Ghardaïa qui m'a accompagné et m'a aidé à prélever les échantillons du lèss.

Je tiens à remercier également tous les membres du Laboratoire des Travaux Publics de Ouest (LTPO) de Saida qui m'ont aidé à réaliser tous les essais géotechnique, en particulier Dr. Abdelkrim BENAHMED.

Je remercie vivement Dr. Noureddine KHELLEAF de l'Université Ferhat ABBAS-Sétif-1 qui m'a beaucoup aidé à interpréter les résultats des tests DRX.

Il y a des personnes de très grande importance dans ma vie, qui m'accompagnent et qui me soutiennent tout le temps. Il s'agit de mes parents mes sœurs et mon frère dont je ne pourrai mesurer leur apport dans l'accomplissement de cette formation. Je vous remercie infiniment.

A tous ceux et celles qui m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre, je vous adresse tous mes sentiments de reconnaissance.

Table des matières

ملخص موسع.....	I
Résumé élargi.....	II
Extended abstract.....	IV
Remerciements.....	V
Table des matières	VII
Nomenclature.....	XII
Liste des Figures	XIV
Liste des Tableaux.....	XIX

Introduction générale

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Partie bibliographique

Chapitre I. Le lœss : définition, origine, caractérisation et présence dans le monde

I.1 Introduction.....	6
I.2 Définition du lœss.....	6
I.3 Origine et types de lœss.....	10
I.3.1 Le lœss glaciaire.....	10
I.3.2 Le lœss désertique.....	13
I.4 La présence du lœss dans le monde.....	16
I.5 Propriétés géotechniques du lœss à travers le monde	22
I.5.1 Gravité spécifique	22
I.5.2 Densité sèche naturelle et indice de vides	24
I.5.3 La granulométrie des grains du loess.....	25
I.5.4 Limites d'Atterberg	26
I.5.5 La perméabilité	27
I.6 L'effondrement du lœss	28
I.7 Conclusion	30

Chapitre II. Rhéométrie et généralités sur la rhéologie des fluides

II.1 Introduction	32
-------------------------	----

II.2 Généralités sur la rhéologie	32
II.2.1 Définition de la rhéologie	32
II.2.2 Écoulement de cisaillement simple	33
II.2.3 Grandeurs fondamentales de la rhéologie	33
II.2.3.1 Contrainte de cisaillement	33
II.2.3.2 Gradient de vitesse	34
II.2.3.3 La viscosité	34
a) Mesure de la viscosité.....	35
a.1) Viscosimètre de Couette.....	35
a.2) Viscosimètre à chute de bille.....	36
II.2.4 Types des fluides	36
II.2.4.1 Fluides newtoniens	37
II.2.4.2 Fluides non-newtonien	37
a) Fluides non-newtonien indépendant du temps.....	38
a.1) Fluide rhéofluidifiant	38
a.2) Fluide rhéoépaississant	38
a.3) Fluide à contrainte seuil	39
a.4) Modèles rhéologiques	39
a.4.1) Modèle de Bingham	40
a.4.2) Modèle d'Herschel-Bulkley	40
a.4.3) Modèle d'Ostwald-de Waele (loi de puissance)	41
a.4.4) Modèle de Cross	41
b) Fluides non-newtonien dépendant du temps.....	42
b.1) Fluide thixotropiques	42
b.1) Fluide anti-thixotropiques	43
II.2.4.3 Fluides viscoélastiques	43
a) Essai de la viscoélasticité.....	45
a.1) Essai de fluage et relaxation	45
a.2) Essai dynamique	46
b) Modélisation de la viscoélasticité.....	47
b.1) Modèle de Kelvin-Voigt	47

b.2) Modèle de Maxwell	50
II.3 Rhéométrie	57
II.3.1 Définition du rhéomètre	57
II.3.2 Typologie de géométries des rhéomètres	57
II.3.2.1 Cylindres coaxiaux	57
II.3.2.2 Géométrie Cône-plan	59
II.3.2.3 Géométrie plan-plan	60
II.3.3 Avantages et inconvénients des différentes géométries de mesures	60
II.3.4 Problèmes expérimentaux	61
II.3.4.1 Glissement aux parois	62
II.3.4.2 Problème d'évaporation	62
II.3.4.3 Inertie de l'outil rotatif	62
II.4 Rhéologie du lœss et application	63
II.5 Conclusion	65

Chapitre III. Traitement du lœss par l'ajout de la chaux et de la bentonite

III.1 Introduction	67
III.2 Traitement du lœss par l'ajout de la chaux	67
III.3 Traitement du lœss par l'ajout de la bentonite	70
III.4 Conclusion	72

Partie expérimentale

Chapitre IV. Caractérisation physico-chimique des échantillons du lœss étudié

IV.1 Introduction	75
IV.2 Échantillonnage et localisation géographique des échantillons du lœss étudié	75
IV.3 Propriétés physico-chimiques des échantillons	76
IV.3.1 Teneur en eau naturelle	76
IV.3.2 Masse volumique des échantillons	77
IV.3.2.1 Masse volumique totale ρ (Méthode géométrique)	77
IV.3.2.2 Masse volumique sèche ρ_d	78
IV.3.2.3 Masse volumique des grains solides	78
IV.3.3 Indice des vides (e)	79
IV.3.4 Degré de saturation (S_r)	79

IV.3.5 Porosité n	80
IV.3.6 L'analyse granulométrique	80
IV.3.7 Essai de consistance des sols (Limites d'atterberg)	82
IV.3.8 Essai d'équivalent de sable	86
IV.3.9 Essai de bleu de Méthylène	87
IV.3.10 Mesure de la teneur en carbonates de calcium CaCO_3	90
IV.3.11 Le pH et la conductivité électrique	92
IV.3.12 Composition chimique et minéralogique	92
IV.3.13 Essai de compactage	95
IV.3.14 Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande	98
IV.4 Conclusion	102
 Chapitre V. Caractérisation rhéologique des suspensions du lœss étudié	
V.1 Introduction	105
V.2 Matériels et méthodes	105
V.2.1 Moyens expérimentaux	105
V.2.2 Choix de la géométrie de mesure	106
V.2.3 Protocole de préparation des échantillons	106
V.2.4 Protocole de mesures rhéologiques	107
V.3 Résultats et discussion	108
V.3.1 Reproductibilité des résultats	108
V.3.2 Comportement rhéologique des suspensions du lœss	110
V.3.2.1 Mesures en écoulement des suspensions du lœss à différentes concentrations..	110
V.3.2.2 L'évolution de la viscosité des suspensions du lœss en fonctions de la concentration massique	112
V.3.2.3 L'évolution des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concertation massique.....	155
V.3.2.4 Thixotropie des suspensions du lœss	119
V.4 Conclusion	122
 Chapitre VI. L'effet de l'ajout des additifs sur les propriétés physico-chimique du lœss étudié	
VI.1 Introduction	124
VI.2 Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite et la chaux ajoutée	124

VI.3 L'effet de l'ajout de la bentonite et la chaux sur la composition granulométrique des échantillons du lœss.....	125
VI.3.1 L'effet de l'ajout de la bentonite sur la composition granulométrique.....	125
VI.3.2 L'effet de l'ajout de la chaux sur la composition granulométrique.....	127
VI.4 L'effet de l'ajout de la bentonite et la chaux sur les propriétés de plasticité des échantillons du lœss.....	128
VI.4.1 L'effet de l'ajout de la bentonite sur les propriétés de plasticité.....	128
VI.4.2 L'effet de l'ajout de la chaux sur les propriétés de plasticité	130
VI.5 L'effet de l'ajout des additifs sur le pH et la conductivité électrique (CE) des échantillons.....	131
VI.5.1 L'effet de l'ajout de la bentonite sur le pH et la conductivité électrique (CE).....	132
VI.5.2 L'effet de l'ajout de la chaux sur le pH et la conductivité électrique (CE).....	135
VI.6 Conclusion	138
Chapitre VII. L'effet de l'ajout des additifs sur le comportement rhéologique des suspensions du lœss	
VII. 1 Introduction	140
VII.2 Préparation des suspensions "lœss-bentonite" et "lœss-chaux" et protocole de mesure rhéologique	140
VII.3 Résultats des tests rhéologiques	140
VII.3.1 L'effet de l'ajout de la bentonite et de la chaux sur le comportement en écoulement des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m=30\%$).....	140
VII.3.2 L'effet de l'ajout de la bentonite et de la chaux sur la viscosité des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m=30\%$).....	143
VII.3.3 Effet de l'ajout de la bentonite et de la chaux sur l'évolution des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m=30\%$).....	146
VII.4 Conclusion	153
Conclusion générale et perspectives	
Conclusion générale et perspectives.....	155
Références bibliographiques	
Références bibliographiques.....	159
Annexes	
Annexes.....	179

Nomenclature

C_m	Concentration massique (%)
CE	Conductivité électrique (mS/cm)
DRX	Diffraction des rayons X
e	Indice des vides
$EDXRF$	Spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie
ES	Equivalent de sable (%)
$J(t)$	Complaisance élastique en (1/Pa)
I_p	Indice de plasticité (%)
G'	Module élastique en (Pa)
G''	Module visqueux en (Pa)
G_0	Module d'élasticité instantanée de Maxwell en (Pa)
K	Indice de consistance en (Pa.s ⁿ)
M_{loess}	Masse du loess (g)
M_{Totale}	Masse totale (g)
n	Indice d'écoulement (-)
n	Porosité (%)
pH	Potentiel Hydrogène
S_r	Degré de saturation (%)
UU	Essai de cisaillement rectiligne non consolidé, non drainé
VBS	Valeur de Bleu de Méthylène (g/100g)
γ	Gradient de vitesse (s ⁻¹)

γ_{dmax}	Masse volumique sèche maximale (g/cm ³)
μ_B	Viscosité plastique (Bingham) en (Pa)
ρ_d	Masse volumique sèche (g/cm ³)
ρ_h	Masse volumique humide (g/cm ³)
ρ_s	Masse volumique des grains solides (g/cm ³)
ρ_w	Masse volumique de l'eau (g/cm ³)
τ	Contrainte de cisaillement (Pa)
τ_0	Seuil d'écoulement (Pa)
ω	Teneur en eau naturelle (%)
ω_l	Limite de liquidité (%)
ω_p	Limite de plasticité (%)
ω_{opt}	Teneur en eau optimale (%)

Liste des Figures

Partie bibliographique

Chapitre I

Figure I.1. Modèle classique de la formation du lœss «glaciaire».....	11
Figure I.2. Le lœss des États-Unis et la direction de Paléo-vent	12
Figure I.3. Modèle classique de la formation du lœss "désertique"	13
Figure I.4. Répartition du lœss à travers le monde	16
Figure I.5. Carte montrant la répartition du lœss en Asie	17
Figure I.6. La distribution du loess en Europe	18
Figure I.7. Répartition du lœss en Amérique du Nord et du Sud	19
Figure I.8. Répartition spatiale du lœss en Afrique et au Moyen-Orient, mers sableuses actives et arénosols (sols sableux).....	20
Figure I.9. Carte de l'Australie montrant la répartition des dépôts du lœss, sable éolien, et la direction des paléovents	21
Figure I.10. Distribution du lœss en Nouvelle-Zélande	22
Figure I.11. Histogramme de 77 de mesures de la gravité spécifique du lœss dans le monde	23
Figure I.12. Histogramme de 407 mesures de la densité sèche naturelle du lœss dans le monde	25
Figure I.13. Distribution de la taille des grains du lœss	26
Figure I.14. Propriétés de plasticités du lœss définies par Gibbs et Holland (1960)	27
Figure I.15. Relation entre la masse volumique sèche et la perméabilité verticale des échantillons de la rivière de Missouri (USA).....	28

Chapitre II

Figure II.1. Schéma représente l'écoulement de cisaillement simple	33
Figure II.2. Expérience de couette	35
Figure II.3. Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité dynamique d'un fluide Newtonien en fonction de la vitesse de cisaillement.....	37
Figure II.4. Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour un fluide rhéofluidifiant	38
Figure II.5. Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour un fluide rhéopaisissant.....	39
Figure II.6. Rhéogramme d'un fluide de type Bingham	40

Figure II.7. Rhéogramme d'un fluide de type Herschel-Bulkley	41
Figure II.8. Lois de comportement rhéologique usuelles	42
Figure II.9. Exemple d'une boucle d'hystérésis	43
Figure II.10. Amortisseur représentant le comportement visqueux du fluide	44
Figure II.11. Ressort représentant le comportement élastique	44
Figure II.12. Essai de fluage suivi de recouvrance a) solide élastique, b) fluide visqueux, c) matériau viscoélastique	46
Figure II.13. Modèle de Kelvin-Voigt pour un solide viscoélastique (association en parallèle d'un ressort et amortisseur).....	47
Figure II.14. Application d'une contrainte constante à l'étude du fluage - recouvrance dans le modèle de Kelvin-Voigt	49
Figure II.15. Réponse de fluage- recouvrance du modèle de Kelvin-Voigt	49
Figure II.16. Application d'une déformation constante pour étudier la réponse de relaxation dans le modèle de Kelvin-Voigt	49
Figure II.17. Réponse de relaxation de contrainte du modèle de Kelvin-Voigt	50
Figure II.18. Présentation du Modèle de Maxwell (l'association en série d'un ressort et d'amortisseur).....	51
Figure II.19. Application d'une contrainte constante à l'étude du fluage - recouvrance dans le modèle de Maxwell.....	52
Figure II.20. Réponse de relaxation de contrainte du modèle de Maxwell.....	52
Figure II.21. Application d'une déformation constante pour étudier la réponse de relaxation dans le modèle de Maxwell.....	54
Figure II.22. Réponse de relaxation de contrainte du modèle de Maxwell.....	54
Figure II.23. G' et G'' en fonction de ω (Comportement de fluide de Maxwell).....	56
Figure II.24. Rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux.....	58
Figure II.25. Géométrie cône-plan.....	59
Figure II.26. Géométrie plan-plan.....	60

Partie expérimentale

Chapitre IV

Figure IV.1. Localisation des sites de prélèvement.....	76
Figure IV.2. Courbes granulométriques des échantillons du lœss étudiés.....	81
Figure IV.3. Classification des échantillons de lœss sur le Diagramme de l'abaque de Casagrande.....	85
Figure IV.4. Propriétés de plasticité des échantillons du lœss selon la classification définie par Gibbs et Holland (1960).....	85

Figure IV.5. Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon (S_1).....	94
Figure IV.6. Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon (S_2).....	94
Figure IV.7. Courbes Proctor des deux échantillons du loess.....	97
Figure IV.8. Courbes contrainte/déformation de l'échantillon (S_1).....	101
Figure IV.9. Courbes contrainte/déformation de l'échantillon (S_2).....	101
Figure IV.10. Courbes intrinsèques des deux échantillons du loess.....	102

Chapitre V

Figure V.1. Le rhéomètre AR 2000 (TA Instrument) utilisé.....	105
Figure V.2. Courbe d'écoulement de la suspension S_1 ($C_m = 30\%$) sur deux prélèvements différents (24 et 48 heures).....	108
Figure V.3. Courbe d'écoulement de la suspension S_2 ($C_m = 30\%$) sur deux prélèvements différents (24 et 48 heures).....	108
Figure V.4. Courbe d'écoulement de la suspension S_1 ($C_m = 55\%$) sur deux prélèvements différents (24 et 48 heures).....	109
Figure V.5. Courbe d'écoulement de la suspension S_2 ($C_m = 55\%$) sur deux prélèvements différents (24 et 48 heures).....	109
Figure V.6. Courbes d'écoulement de l'échantillon (S_1) en fonction des concentrations massiques.....	110
Figure V.7. Courbes d'écoulement de l'échantillon (S_2) en fonction de la concentration massique.....	111
Figure V.8. L'évolution de la viscosité de l'échantillon (S_1) en fonction de la concentration massique.....	112
Figure V.9. L'évolution de la viscosité de l'échantillon (S_2) en fonction de la concentration massique.....	113
Figure V.10. Variation de la viscosité de la suspension du loess (S_1) en fonction de la concentration pour différents vitesses de cisaillement.....	114
Figure V.11. Variation de la viscosité de la suspension du loess (S_2) en fonction de la concentration pour différents vitesses de cisaillement.....	114
Figure V.12. Variation de la contrainte seuil d'écoulement de la suspension (S_1) en fonction de la concentration massique.....	116
Figure V.13. Variation de la consistance de suspension (S_1) en fonction de la concentration massique.....	116
Figure V.14. Variation de l'indice d'écoulement de suspension (S_1) en fonction de la concentration massique.....	117

Figure V.15. Variation de la contrainte seuil d'écoulement de la suspension (S_2) en fonction de la concentration massique.....	117
Figure V.16. Variation de la consistance de suspension (S_2) en fonction de la concentration massique.....	118
Figure V.17. Variation de l'indice d'écoulement de suspension (S_2) en fonction de la concentration massique.....	118
Figure V.18. Boucles d'hystérésis de la suspension du lœss (S_1).....	120
Figure V.19. Boucles d'hystérésis de la suspension du lœss (S_2).....	120
Figure V.20. L'évolution de viscosité de la suspension (S_1) ($C_m=30\%$) à une contrainte de cisaillement constante correspondant à l'étape du palier.....	121
Figure V.21. L'évolution de viscosité de la suspension (S_2) ($C_m=30\%$) à une contrainte de cisaillement constante correspondant à l'étape du palier.....	121

Chapitre VI

Figure VI.1. L'effet de l'ajout de la bentonite sur la composition granulométrique de l'échantillon (S_1).....	126
Figure VI.2. L'effet de l'ajout de la bentonite sur la composition granulométrique de l'échantillon (S_2).....	126
Figure VI.3. L'effet de l'ajout de la chaux sur la composition granulométrique de l'échantillon (S_1).....	127
Figure VI.4. L'effet de l'ajout de la chaux sur la composition granulométrique de l'échantillon (S_2).....	127
Figure VI.5. L'effet de l'ajout de la bentonite sur les propriétés de plasticité de l'échantillon (S_1).....	129
Figure VI.6. L'effet de l'ajout de la bentonite sur les propriétés de plasticité de l'échantillon (S_2).....	129
Figure VI.7. L'effet de l'ajout de la chaux sur les propriétés de plasticité de l'échantillon (S_1).....	130
Figure VI.8. L'effet de l'ajout de la chaux sur les propriétés de plasticité de l'échantillon (S_2).....	131
Figure VI.9. L'effet de la bentonite sur le pH de l'échantillon (S_1).....	132
Figure VI.10. L'effet de la bentonite sur le pH de l'échantillon (S_2).....	133
Figure VI.11. L'effet de la bentonite sur la conductivité électrique de l'échantillon (S_1).....	134
Figure VI.12. L'effet de la bentonite sur la conductivité électrique de l'échantillon (S_2).....	134
Figure VI.13. L'effet de la chaux sur le pH de l'échantillon (S_1).....	135
Figure VI.14. L'effet de la chaux sur le pH de l'échantillon (S_2).....	136

Figure VI.15. L'effet de la chaux sur la conductivité électrique de l'échantillon (S_1).....	137
Figure VI.16. L'effet de la chaux sur la conductivité électrique de l'échantillon (S_2).....	137

Chapitre VII

Figure VII.1. Effet de la l'ajout de la bentonite à différentes concentration sur l'écoulement de la suspension (S_1) à une concentration massique ($C_m=30\%$).....	141
Figure VII.2. Effet de la l'ajout de la bentonite à différentes concentration sur l'écoulement de la suspension (S_2) à une concentration massique ($C_m=30\%$).....	142
Figure VII.3. Effet de la l'ajout de la chaux à différentes concentration sur l'écoulement de la suspension (S_1) à une concentration massique ($C_m=30\%$).....	142
Figure VII.4. Effet de la l'ajout de la chaux à différentes concentration sur l'écoulement de la suspension (S_2) à une concentration massique ($C_m=30\%$).....	143
Figure VII.5. Effet de l'ajout de la bentonite, à différentes concentration, sur la viscosité de la suspension (S_1) à une concentration massique ($C_m=30\%$).....	144
Figure VII.6. Effet de la l'ajout de la bentonite, à différentes concentration, sur la viscosité de la suspension (S_2) à une concentration massique ($C_m=30\%$).....	144
Figure VII.7. Effet de l'ajout de la chaux, à différentes concentration, sur la viscosité de la suspension (S_1) à une concentration massique ($C_m=30\%$).....	145
Figure VII.8. Effet de l'ajout de la chaux, à différentes concentration, sur la viscosité de la suspension (S_2) à une concentration massique ($C_m=30\%$).....	145
Figure VII.9. L'évolution de la contrainte seuil des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m =30\%$) en fonction de la concentration de la bentonite.....	146
Figure VII.10. L'évolution de la consistance des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m =30\%$) en fonction de la concentration de la bentonite.....	147
Figure VII.11. L'évolution de l'indice d'écoulement des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m =30\%$) en fonction de la concentration de la bentonite.....	147
Figure VII.12. L'évolution de la contrainte seuil des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m =30\%$) en fonction de la concentration de la chaux.....	149
Figure VII.13. L'évolution de la consistance des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m =30\%$) en fonction de la concentration de la chaux.....	149
Figure VII.14. L'évolution de l'indice d'écoulement des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m =30\%$) en fonction de la concentration de la chaux.....	150

Liste des Tableaux

Partie bibliographique

Chapitre I

Tableau I.1.	Définitions du lœss selon INQUA (International Union for Quaternary Research).....	9
Tableau I.2.	Documents ciblés pertinents pour des exemples de lœss désertique.....	16
Tableau I.3.	Valeurs de la gravité spécifique du lœss dans certains régions du monde.....	23
Tableau I.4.	Valeurs de la densité sèche et l'indice de vides du lœss dans différentes régions du monde.....	24

Chapitre II

Tableau II.1.	Avantages et inconvénients des différentes géométries de mesures.....	75
----------------------	---	----

Partie expérimentale

Chapitre IV

Tableau IV.1.	Résultats de la détermination de la masse volumique sèche de l'échantillon (S_1).....	77
Tableau IV.2.	Résultats de la détermination de la masse volumique sèche de l'échantillon (S_2).....	78
Tableau IV.3.	Résultats de la masse volumique humide des échantillons.....	78
Tableau IV.4.	Résultats de la masse volumique des grains solides des échantillons étudiés.....	79
Tableau IV.5.	Degré de saturation d'après Terzaghi.....	80
Tableau IV.6.	Composition du lœss dans différentes parties du monde.....	82
Tableau IV.7.	Présentation les résultats de la limite de liquidité de l'échantillon (S_1).....	83
Tableau IV.8.	Présentation les résultats de la limite de liquidité de l'échantillon (S_2).....	83
Tableau IV.9.	Présentation les résultats de la limite de plasticité de l'échantillon (S_1).....	84
Tableau IV.10.	Présentation les résultats de la limite de plasticité de l'échantillon (S_2).....	84
Tableau IV.11.	Propriétés de plasticité des échantillons du lœss (S_1) et (S_2).....	84
Tableau IV.12.	Propriétés de plasticité du lœss de nombreuses régions du monde.....	86
Tableau IV.13.	Résultats de l'essai d'équivalent de sable des deux échantillons (S_1) et (S_2).....	87
Tableau IV.14.	Classification des sols selon la valeur d'équivalent de sable.....	87
Tableau IV.15.	Calculs à exécuter de l'essai de bleu de méthylène.....	88
Tableau IV.16.	Résultats de l'essai de VBS de l'échantillon (S_1).....	88
Tableau IV.17.	Résultats de l'essai de VBS de l'échantillon (S_2).....	89
Tableau IV.18.	Classification des sols selon la valeur VBS.....	89

Tableau IV.19. Classification des sols selon la teneur en CaCO_3	91
Tableau IV.20. Teneur en CaCO_3 du loess dans plusieurs parties du monde.....	91
Tableau IV.21. Qualité des sols suivant la valeur de la conductivité électrique.....	92
Tableau IV.22. Composition chimique (%) du loess dans différentes régions du monde.....	93
Tableau IV.23. Présentation les résultats de calcul de l'essai Proctor normal de l'échantillon (S_1).....	96
Tableau IV.24. Présentation les résultats de calcul de l'essai Proctor normal de l'échantillon (S_2).....	96
Tableau IV.25. Lectures de capteur de mesure de l'effort T de l'échantillon (S_1).....	99
Tableau IV.26. Lectures de capteur de mesure de l'effort T de l'échantillon (S_2).....	99
Tableau IV.27. Calcul de la contrainte de cisaillement de l'échantillon (S_1).....	100
Tableau IV.28. Calcul de la contrainte de cisaillement de l'échantillon (S_2).....	100

Chapitre V

Tableau V.1. Concentrations massiques des suspensions du loess étudié.....	107
Tableau V.2. Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley pour différentes concentrations de la suspension (S_1).....	115
Tableau V.3. Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley pour différentes concentrations de la suspension (S_2).....	115

Chapitre VI

Tableau VI.1. Caractéristiques physiques de la bentonite utilisée.....	124
Tableau VI.2. Composition chimique de la bentonite utilisée.....	124
Tableau VI.3. Caractéristiques physico-chimiques de la chaux utilisée.....	125

Chapitre VII

Tableau IV.1 Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concentration de la bentonite ajoutée à la suspension (S_1).....	148
Tableau IV.2 Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concentration de la bentonite ajoutée à la suspension (S_2).....	148
Tableau IV.3. Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concentration de la chaux ajoutée à la suspension (S_1).....	150
Tableau IV.4. Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concentration de la chaux ajoutée à la suspension (S_2).....	151
Tableau IV.5. Taux d'accroissement des paramètres d'Herschel-Bulkley des suspensions de base (S_1) et (S_2) en présence de 8% de bentonite et de chaux.....	151

Introduction générale

Introduction générale

Le lœss est une roche sédimentaire détritique meuble. Il se compose de grains de taille comprise entre celle du sable et d'argile (Giménez et al. 2012 ; Muhs 2018 ; Cazacu et Draghici 2019). Ce type de sol est localisé essentiellement dans les régions arides et semi-arides (Li et al. 2016). Plusieurs recherches se sont notamment focalisé sur la caractérisation géotechnique du lœss, l'étude de la microstructure, l'examen de la sensibilité à la déformation ou le traitement de son effondrement, etc. (Yuan et Wang 2009 ; Marschalko et al. 2013; Chen et al. 2019). Les résultats ont montré que le lœss est caractérisé par une structure ouverte et une porosité élevée (Kalantari 2013 ; Li et al. 2016 ; Li et al. 2020). Ses couches sont sensibles à l'affaissement. Ceci a souvent provoqué des catastrophes géotechniques (Delvoie 2017). Les sols effondrables sont responsables des dommages aussi bien dans les bâtiments que dans les infrastructures routières (Dijkstra et Smalley 2012 ; Li et al. 2016), entraînant ainsi des pertes financières considérables.

Dans l'ingénierie des sols, cette problématique représente une préoccupation de grande importance. La fragilité des forces inter-particulaires du lœss est la principale cause de ces problèmes. Pour faire face, des techniques d'amélioration de la résistance sont envisagées, examinées, évaluées et proposées. L'ensemble de ces techniques consiste à renforcer et stabiliser les liaisons inter-particulaires du sol (Jefferson et al. 2005). La majorité de ces techniques reposent sur l'ajout des agents cimentaires tels que les argiles et la chaux (Pei et al. 2015 ; Alercia et al. 2015 ; Zhang et al. 2017 ; Firoozfar et Dousti 2019). L'injection de l'argile dans le lœss peut réduire la porosité, diminuer ou éliminer la collapsibilité et augmenter le module de déformation (Evstatiev 1988; Jefferson et al. 2005). D'autres techniques ont montré que l'ajout de la chaux modifie les propriétés géotechniques et améliore les propriétés mécaniques des sols argileux (Bell 1996; Calik et Sadoglu 2014 ; Babu et Poulouse 2018). La résistance des sols se trouve ainsi renforcée (Ghobadi et al. 2014 ; Gao et al. 2018).

Outre le domaine des études géotechniques, l'exploration à travers la rhéologie représente un intérêt certain. Toutefois pour ce domaine d'étude, nous ne disposons que de quelques contributions scientifiques qui sont réservées aux applications de la rhéologie en mécanique des sols. L'application de cette discipline scientifique dans les études de mécanique des sols est encore relativement limitée. La présente thèse intitulée « rhéologie d'une suspension solide/solide - solide/liquide à base de lœss en vue de l'obtention d'un nouveau matériau »

visé à introduire la rhéologie comme méthode appropriée pour déterminer le comportement mécanique de la microstructure des suspensions du lœss soumis à des contraintes externes.

Étant donné que la rhéologie présente de nombreux avantages pour explorer et évaluer les performances d'additives. Elle est appliquée dans l'examen de la modification des propriétés des sols (Moreno 2001).

En Algérie, des dépôts lœssiques sont observés notamment dans la région de Ghardaïa. Cette région est localisée à 600 kilomètres au sud d'Alger. Elle fait partie du centre du désert algérien. La région de Ghardaïa, qui représente l'une des agglomérations importantes du Sud de l'Algérie, se caractérise par des conditions de vie restrictives. La recherche des opportunités de développement dans cette région reste un défi permanent pour les pouvoirs publics. Le développement socio-économique représente, non seulement, un facteur de stabilisation de la population mais aussi une opportunité de préserver la richesse du patrimoine de la région du M'zab. De part de sa richesse patrimoine, archéologique et architecturale, la vallée du M'zab est classée par L'UNESCO depuis 1982 dans le patrimoine mondial (Schmitt 2015). Outre des raisons socio-économiques, la région de Ghardaïa qui est d'importance sociale et culturelle, est désignée comme site d'exploration, car le sol lœssique englobe une partie importante de sa superficie. Ses infrastructures de bâtiment et de travaux publics sont fréquemment menacées par l'instabilité et l'effondrement dû au changement des propriétés du sol sous l'effet mécanique. À cet effet et dans le cadre des travaux de cette thèse, parmi les principaux objectifs assignés c'est l'utilisation économie environnementale de ce type de sol à travers l'examen et l'évaluation des propriétés géotechniques du lœss de cette région. Un autre objectif est la recherche de l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques et rhéologiques du lœss. Cette recherche vise à contrôler les alias des géo-risques dans cette région. Dans ce cadre, cette partie de travail s'oriente vers l'examen des performances de stabilité et de résistance du lœss de Ghardaïa par l'ajout de la bentonite et de la chaux.

Le manuscrit de la présente thèse se compose de deux grandes parties, une partie bibliographique et une partie expérimentale.

La partie bibliographique se divise en trois chapitres :

Le chapitre I ; est constitué une synthèse bibliographique comprend la définition, l'origine, la distribution et les propriétés géotechniques du lœss dans le monde. Dans ce chapitre, l'effondrement du lœss est également abordé.

Le chapitre II ; présente des généralités sur la rhéologie des fluides et la rhéométrie. Le chapitre décrit aussi la rhéologie du lœss et ses applications.

Le chapitre III est dédié aux méthodes de traitement des propriétés du lœss par l'ajout de la bentonite et la chaux.

La partie expérimentale est réalisée en quatre chapitres :

Le chapitre IV ; est consacré à l'étude physico-chimique des échantillons du lœss étudiés. Plusieurs tests physiques, chimiques et mécaniques sont réalisés. Une étude comparative du lœss Algérien avec ceux de plusieurs régions du monde est réalisée et discutée. Ce chapitre a permis la caractérisation et la classification du lœss Algérien d'un point de vue géotechnique.

Le chapitre V ; consiste d'une étude de la rhéologie des suspensions lœss-eau. Le comportement rhéologique de la suspension du lœss est étudié à différentes concentrations massiques. Dans ce chapitre, le phénomène de la thixotropie est également évalué.

Le chapitre VI ; examine l'effet de l'ajout de la bentonite et la chaux sur les propriétés physico-chimiques des échantillons du lœss étudiés. Les résultats d'application de plusieurs concentrations d'additifs sont présentés, analysés et discutés.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude de l'influence de l'ajout de la bentonite et la chaux sur les propriétés rhéologiques de la suspension du lœss à une concentration massique ($C_m = 30 \%$). Les exigences d'amélioration des caractéristiques de résistance des mélanges lœss-bentonite et lœss-chaux sont présentées et évaluées.

Le travail se termine par des conclusions résumant les principaux résultats et des perspectives.

Partie bibliographique

Chapitre I

Le lœss : définition, origine,
caractérisation et présence
dans le monde

I.1 Introduction

Le terme ‘lœss’ est une transcription de l’Allemand ‘Löss’. Un terme introduit en 1820 par le géologue Allemand K.C. Von Leonhard, pour décrire les dépôts limoneux meubles et friables de la vallée du Rhin en Allemagne (Kirchenheimer 1969). Le mot ‘lœss’ est par la suite introduit dans la langue anglaise grâce aux travaux de Lyell (1834). Ses travaux concernent les dépôts du lœss de la vallée du Rhin et du Mississippi.

À l’époque, les dépôts lœssiques étaient considérés comme des dépôts fluviaux. Ce n’est en 1857 que l’aspect de dépôt éolien des poussières lœssiques a été évoqué (Russell 1944). En revanche et par similitude et projection, les Chinois ont utilisé le terme ‘huangtu’ pour décrire les dépôts meubles (Lyell 1834). Ce terme est notamment utilisé pour nommer les sols grenus et fins composés principalement du limon transporté et déposé par le vent. Le même terme a été étendu aux poussières limoneuses transportées par le vent et déposées sur les zones situées assez loin de leurs origines.

Le présent chapitre traite le lœss dans son aspect phénoménologique. Il comporte en particulier la définition du lœss, son origine, ses propriétés géotechniques et sa répartition à travers le monde.

I.2 Définition du lœss

Le lœss est un sédiment entraîné, transporté et déposé par le vent. Généralement, il est constitué d’une fraction de 60 % à 90 % de particules de taille du limon (2–50 μm). Il contient également du sable (> 50 μm) et d’argile (< 2 μm). Le lœss est reconnaissable sur le terrain en tant qu’une roche sédimentaire. Il peut avoir une épaisseur de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres (Sheeler 1968).

Généralement, les dépôts lœssiques ont une structure lâche, à l’exception des lœss qui sont caractérisés par une condition massive (structurée). La compacité dépend des liaisons inter-particules. Ces derniers se trouvent renforcés en présence d’argile et les carbonates, où les forces matérielles sont considérables. En effet, des chercheurs européens considèrent que la compacité engendrée par la présence des carbonates est due à un processus de cimentation qu’ils ont le nommé « lœssification » (Muhs 2014). Toutefois, la plupart des chercheurs n’ont pas de définition restreinte du lœss. Ils considèrent que tous les limons éoliens qui forment un corps sédimentaire distinct sont considérés comme un lœss (Pye 1987 ; Muhs et Bettis 2003). Beaucoup de chercheurs ont décrit le lœss comme un limon uniforme de couleur jaune ou un limon homogène non stratifié légèrement jaune avec la présence du calcaire. Ci-après, on

présente à titre exhaustif, les principales définitions données au lœss. Ces définitions sont données suivant l'ordre chronologique de leur existence.

Gibbs et Holland (1960) ont défini le lœss comme un sédiment clastique quartzeux composé d'un mélange de limon, sable fin et de particules d'argile, et disposé dans un tissu cohésif ouvert.

Quant Butzer (1965) a défini le lœss comme un sable limoneux non stratifié jaune pâle, riche en structures capillaires verticales. Il a divisé le lœss en deux types : un lœss périglaciaire produit de dépôts glaciaires et un lœss péri-désertique provenant des zones désertiques. Il a prêté que le matériau se compose essentiellement de quartz (60–70%), carbonates (10–30%) et de minéraux argileux (10–20%).

Smalley et Vita-Finzi (1968) ont défini le lœss comme un dépôt clastique produit par le vent et constitué principalement de particules de quartz de 20 à 50 μm . Ils ont noté que le lœss présente généralement une variation naturelle importante en termes de l'épaisseur, taille des grains, couleur, minéralogie, composition géochimique, caractéristiques géotechniques et de morphologie. D'après les auteurs, les critères essentiels pour qu'un sédiment soit qualifié comme lœss sont : (a) le dépôt consiste principalement du limon déposé par le vent (b) l'accumulation s'est produite par le vent.

D'après Sheeler (1968), le lœss se compose principalement de grains angulaires du limon, sable et d'argile. La proportion du limon est généralement la plus dominante. La calcite est également présentée avec des quantités variées de 0 % à plus de 10 %. Sa couleur varie du jaune au brun rougeâtre avec une couleur chamois. La structure du lœss est généralement ouverte. La plupart des grains sont recouverts de minces couches d'argile. Tandis que certains grains sont enrobés d'un mélange de calcite et d'argile. Des particules individuelles de calcite de la taille du limon peuvent être également trouvées bien dispersées dans la masse du lœss. Les couches d'argile sont le principal facteur de cimentation.

Smalley et Smalley (1983) ont défini le processus de la formation du lœss. Ils considèrent quatre mécanismes : (1) la réserve de la genèse du lœss sont des matériaux de la taille de (20–60 μm). (2) les matériaux sont ensuite transportés par le vent. (3) après le transport, le matériau se dépose et (4) subit des changements après la sédimentation.

Pye (1984) a défini le lœss comme un dépôt du limon transporté par le vent et constitué principalement de quartz, feldspath, mica, minéraux argileux et des grains de carbonates en différentes proportions. Il a noté que la distribution granulométrique du lœss 'typique' se trouve entre 20 et 40 μm . L'auteur a fait remarquer, à travers une analyse bibliographique, qu'il y a des tentatives pour donner une définition du lœss sur la base de ses propriétés

physiques et minéralogiques. Toutefois, aucune de ces propositions n'avait prouvé une satisfaction entière. Il déclare qu'un lœss typique contient souvent jusqu'à 10 % de sable fin ($> 63 \mu\text{m}$). Dans le cas où la teneur en sable dépasse 20 %, le terme 'lœss sableux' est plus approprié. Si le sédiment contient plus de 20 % d'argile, il peut être décrit comme un lœss argileux (Pye 1987). À l'état sec, le lœss est capable de résister aux efforts considérables. En présence de l'eau, la résistance au cisaillement est considérablement réduite. À l'état de saturation, le matériau subit souvent des affaissements.

Derbyshire et Mellors (1988) ont rapporté que le lœss est un matériau friable et facilement érodé par les rivières. Il est déposé par le vent, durant les deux ou trois millions d'années passées, dans plusieurs régions du monde. Il est non stratifié, composé principalement de particules du limon à une granulométrie uniforme.

D'après Pésci (1990), les lœss sont des dépôts limoneux, homogènes, poreux, perméables avec une couleur jaune pâle. Ils sont constitués principalement de limon grossier (10 à 50 μm), avec de petites quantités d'argile. De point de vue minéralogique, le quartz est le principal élément présent de sa composition, avec quelques feldspaths et carbonates. Généralement, il est non stratifié. Il est légèrement cimenté et stable lorsqu'il est sec et facilement érodé lorsqu'il est mouillé.

Suivant les définitions des chercheurs mentionnés ci-dessus, il y a un accord général sur le fait que la grande majorité des dépôts du lœss sont formés de matériaux qui sont transportés par le vent. Beaucoup de chercheurs ont convenu que certaines conditions doivent être réunies pour le développement des dépôts du lœss.

Ainsi, Smalley (1995) déclare que quatre facteurs sont nécessaires pour la production d'une formation massive de matériau du lœss : (1) une source de poussière, (2) le vent pour transporter la poussière, (3) une végétation pour capter la poussière, et (4) un temps suffisant pour l'accumulation.

Auparavant, Gibbs et Holland (1960) avancent comme conditions au développement du lœss : (1) la présence d'une source du limon et d'argile assez adéquate pour tenir compte des dépôts remarquables, (2) une période de forts vents dominants d'une direction, (3) un lieu de dépôt, et (4) des conditions d'aridité.

Le Tableau (I.1) illustre les définitions du lœss établies par la commission de l'INQUA (International Union for Quaternary Research).

Tableau I.1. Définitions du lœss selon INQUA (International Union for Quaternary Research) (Smalley and leach 1978)

Nom	Définition/ description et synonymes
Lœss	Synonymes allemands : Löss, typischer Löss ("typical lœss"). Caractéristiques : la fraction dominante du sédiment est dans 60-20 µm (limon grossier, sable très fin), non stratifié, à l'origine calcaireux, assez poreux, en général, le sol sec est jaune, jaune clair, jaune brunâtre.
Lœss Sableux	Synonymes allemands : Sandlöss, Flotssand, lössiger Sand, sandiger Löss. Caractéristiques : mélange de grains de dimension de 60-20 µm et de 500-200 µm (sable fin, sable moyen). Souvent, la distribution de dimensions de particules montre un sommet majeur dans l'intervalle du limon et un sommet mineur dans l'intervalle du sable moyen. Parfois, il y a une distribution égale entre les quantités du limon, de sable très fin et de sable moyen. Il est souvent non stratifié ou sous forme de couches minces, généralement non calcaireux. Il n'est pas assez poreux comme le lœss et de la même couleur que le lœss.
Lœss Argileux	Synonymes allemands : Tonlöss, toniger Löss, Tonreicher Löss. Caractéristiques : la dimension maximale des particules de sédiments est dans l'intervalle de 6-20 µm avec 25-30 % des particules qui sont plus petites que 2 µm (dimension d'argile); non stratifiés, faible porosité, même teneur en carbonate, et même couleur que le lœss. Synonymes allemands: Lössderivate, lössartige Sediments.
Sédiments semblables au lœss	Caractéristiques : le terme couvre le sol d'origine éolienne qui est transporté ou redéposé selon plusieurs processus et/ou est modifié in situ. les sédiments semblables au lœss proviennent du lœss, du lœss sableux, ou du lœss argileux; en tout cas leur porosité est plus faible que celle du matériau d'origine ; grande variation de teneur en carbonate, quelques matériaux peuvent être essentiellement non calcaireux, les couleurs peuvent être différentes.

I.3 Origine et types du lœss

L'étude et l'examen du lœss ont fait l'objet de nombreuses recherches. D'après la bibliographie consultée, le lœss est généralement composé de particules de taille du limon, où les particules solides sont érodées, transportées et déposées par l'action du vent.

Du point de vue typologique, deux grandes familles du lœss peuvent être distinguées : le lœss glaciaire et le lœss désertique.

I.3.1 Le lœss glaciaire

Le Nord de l'Amérique et l'Europe sont des exemples de l'accumulation glaciaire de matériaux fins susceptible d'être déplacés par le vent (Catt 1988). Dans les régions de Nebraska, Kansas, Illinois, Palouse, Mississippi, Argentine, Ukraine, bassin du Danube et le Nord de la France, l'accumulation du lœss est très épaisse et peut atteindre des dizaines de mètres. Toutefois, la possibilité d'une accumulation secondaire devrait être envisagée. Cette accumulation résulte de l'effet de l'eau de surface après le dépôt causé par le vent (Velde et Meunier 2008). Ce type du lœss est donc d'origine glacio-fluviale. Il est sous forme de poudre fine résulte de l'érosion des roches environnementales. La poudre est produite de l'interaction de plusieurs processus géologiques, principalement l'abrasion des mouvements des glaciers continentaux. Gibbs et Holland (1960) ont noté que la charge suspendue des glaciers déposée dans des plaines est soumise à l'érosion à la fois par le vent et l'eau. Ils ont déclaré que les matériaux apportés par les cours d'eau sont ensuite déposés sous forme de limon sur le long des rivières et dans les plaines inondables. Ils peuvent être de nouveau remis en suspension et transportés par le vent. Par la suite, ils sont redéposés (Figure I.1).

Le modèle classique de la formation du lœss, inspiré des définitions présentées, montre que les dépôts lœssiques sont principalement des marqueurs de périodes glaciaires à l'échelle continentale.

Smalley (1966) suggère que les dépôts du lœss semblent être un phénomène Quaternaire. Ces dépôts indiquent une relation spatiale avec les zones de glaciation continentales du Pléistocène. Ils sont dénommés : les lœss glaciaires ou les lœss périglaciaires. L'auteur a noté aussi que les particules du limon déposées successivement sont formées en grande partie par broyage sous-glaciaire.

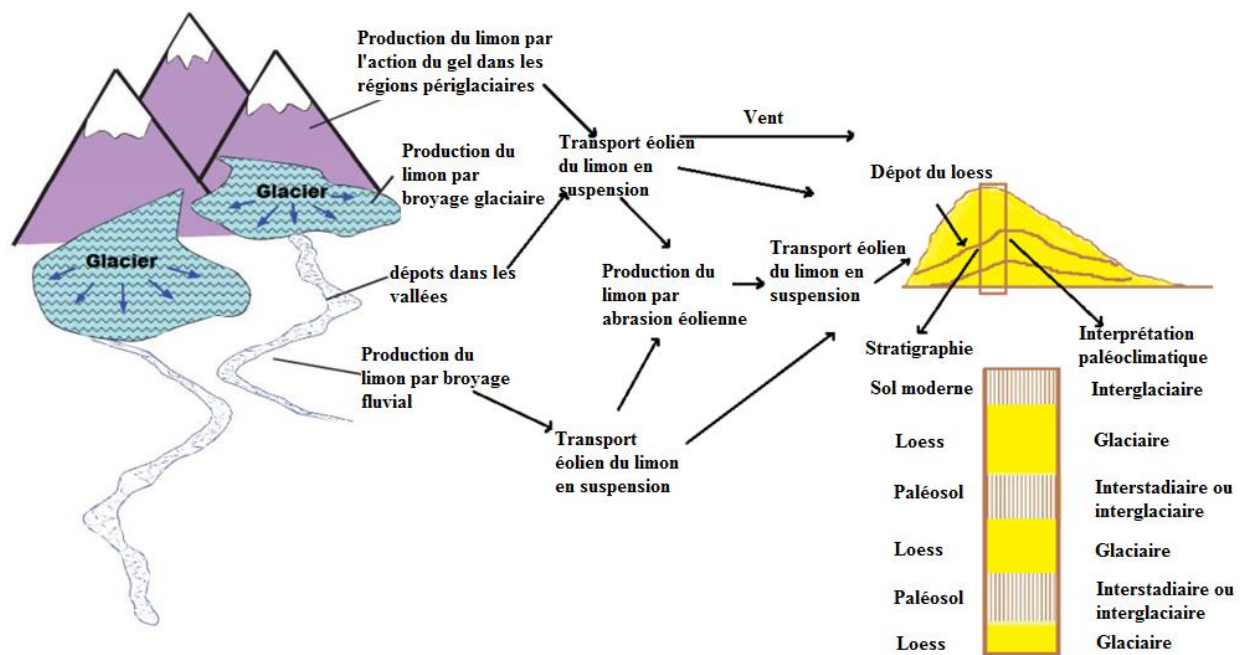


Figure I.1. Modèle classique de la formation du lœss «glaciaire» Muhs et Bettis (2003)

À titre d'exemples, on cite les dépôts lœssiques du bassin du Missouri et de la vallée du Mississippi (États-Unis). Ces dépôts sont d'origine glacio-fluviale (Gibbs et Holland 1960). Les auteurs notent qu'à la fin des périodes glaciaires du pléistocène, de vastes zones des plaines inondables sont composées principalement de sable, de limon et d'argile provenant de l'action abrasive des glaciers. Les particules du limon et d'argile mélangées avec le sable fin sont transportées par le vent et redéposées plus loin de la source aux lieux-ci indiqué. En revanche, les particules grossières se trouvaient déposées près de la source.

En référence des travaux de Smith (1942) qui a examiné le lœss d'Illinois, et Swineford et Frye (1945) dont les travaux sont rapportés au lœss du Kansas, il s'avère que la taille des grains du lœss diminue progressivement au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source. En général, les cours d'eau, acteurs du transport solide, contiennent beaucoup de limon provenant de l'action abrasive des glaciers dans la région des montagnes rocheuses.

Au centre des États-Unis, dans la région de Peoria, le lœss s'est accumulé au cours de la fin de la période glaciaire du Wisconsin. Il couvre une superficie supérieure à 4.2×10^6 km². Le lœss formé durant cette période est appelé lœss du Wisconsin (Ruhe 1983). Dans cette région, les vents du Nord-ouest sont responsables du transport de la poussière du lœss (Muhs et al. 2013). Outre l'action du vent, les écoulements de la rivière du Missouri (Ouest de l'Iowa) jouent aussi un rôle dans le transport et l'accumulation des sédiments fluvio-glaciaires. Ces

sédiments proviennent principalement de la calotte glaciaire Laurentidienne (Bettis et al. 2003) (Figure I.2).

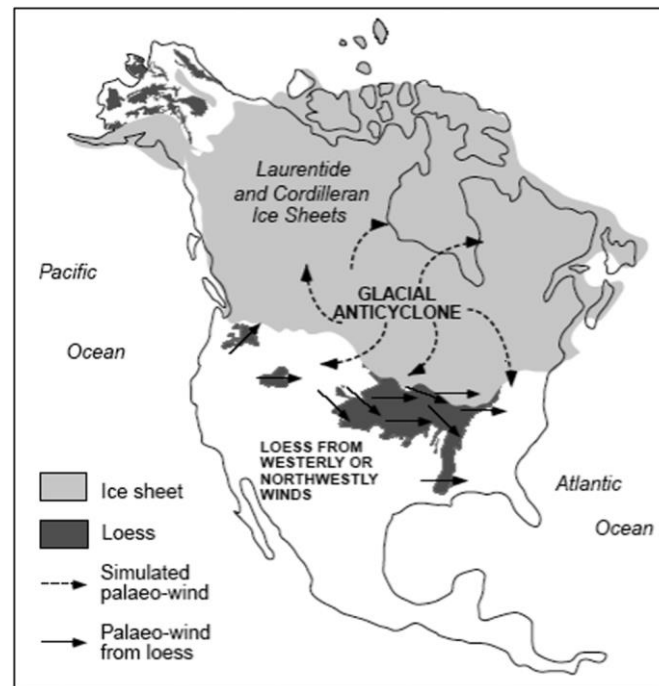


Figure I.2. Le lœss des États-Unis et la direction de paléo-vent (Bettis et al. 2003)

En Europe, les dépôts lœssiques sont liés aux glaciations du Pléistocène. Ils se situent généralement en dehors des limites des dernières glaciations fennoscandiennes et alpines (Rousseau et al.2018). Ces dernières sont les deux principales sources de matériaux du lœss en Europe.

En Pologne, ce type de lœss est localisé dans le Sud du pays, où la limite sud est formée par les montagnes des Carpates. Les particules de quartz qui forment la masse du lœss sont produites par les glaciers du Nord (Badura et al. 2013). En Pologne, la théorie éolienne de la formation des gisements du lœss est largement adoptée (Smalley et leach 1978). En effet, les travaux des auteurs indiquent que le lœss en Pologne est transporté par le vent à travers les Carpates et les montagnes à proximité. Ceci confirme l'approche de la théorie éolienne. Une partie de ce lœss est identifié dans les terres des plaines de la Bohême, la Moravie, la plaine hongroise, la Valachie et la Moldavie. Dans l'Est de l'Autriche et dans la petite plaine hongroise, de grandes quantités de sable et de limon glaciaire sont transportées par l'eau de fonte des glaciers, qui traverse la dépression de Moravie entre le massif de Bohême et l'extrémité occidentale des Carpates (Smalley et leach 1978).

I.3.2 Le lœss désertique

Le lœss ‘désertique’ est un terme utilisé pour décrire le limon éolien identifié dans les régions arides et semi-arides. En effet, les particules du limon sont le résultat de plusieurs mécanismes qui peuvent être produits dans ces régions. La succession desdits mécanismes est schématisée dans le modèle présenté dans la figure (I.3). Les processus des mécanismes comprennent l’éclatement du gel, le broyage par le transport fluvial, le mouvement de masse (réduction de la taille des particules par écrasement ou broyage), l’altération chimique, l’altération par le sel et l’abrasion éolienne.

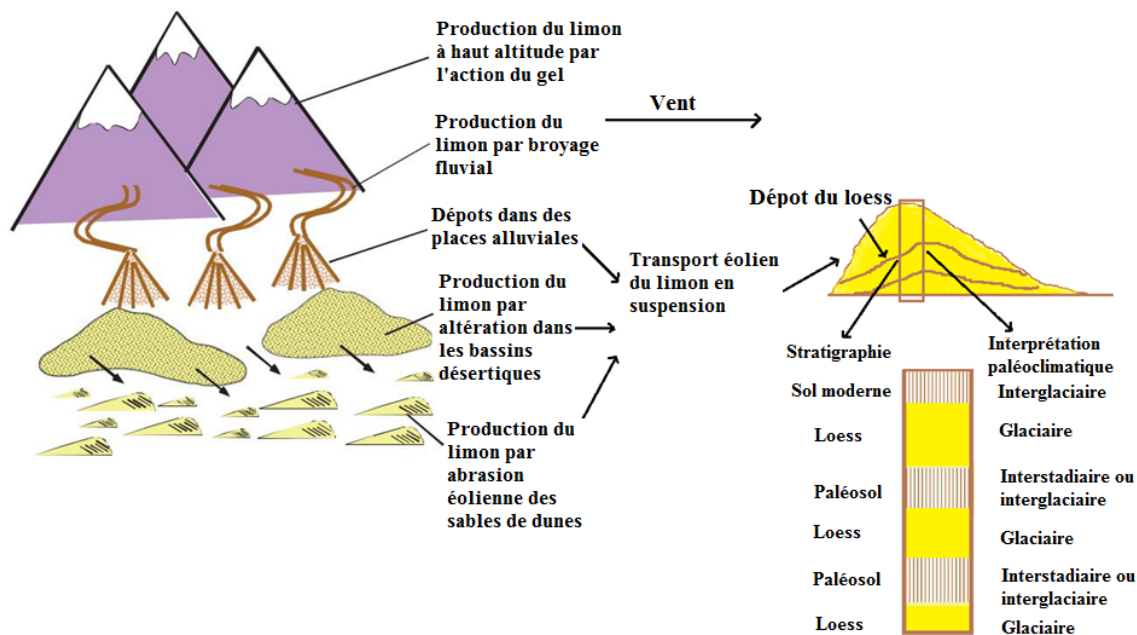


Figure I.3. Modèle classique de la formation du lœss "désertique" Muhs et Bettis (2003)

Le Sahara est la plus grande zone d’activités de tempêtes de poussières au monde. Toutefois, Smalley et Vita-Finzi (1968) remarquent que quelques dépôts du lœss relativement limités peuvent se produire en marge de certains déserts. Ils déclarent ainsi que des quantités du limon de quartz sont produites par l’abrasion éolienne avant d’être piégées sur les marges des régions arides et semi-arides.

Plusieurs chercheurs ont dénommé les dépôts du lœss marginaux du désert comme ‘lœss désertique’ (Coudé-Gaussen 1984). La Chine, l’Asie centrale, le Moyen-Orient et l’Afrique sont citées comme des meilleurs exemples des lieux de production du lœss désertique.

En Chine, l’origine des dépôts lœssiques est reconnue comme désertique depuis longtemps. Le dépôt du lœss de plateau chinois recouvre les régions du Shaanxi, Gansu et Ningxia. Ils entourent les bordures de montagnes et occupent environ 317 000 km² de surface. L’épaisseur

peut atteindre les 300 mètres (Derbyshire 1983a). Le lœss en Chine est formé principalement du limon. Certains chercheurs chinois ont montré que la distribution granulométrique du lœss en Chine est caractérisée par une diminution de la taille moyenne des particules au fur et à mesure qu'on se déplace dans la direction Sud-Est. Ce constat suggère que les matériaux proviennent d'une source Nord-ouest (Derbyshire 1983a). Les déserts tels que les Ordos, Gobi et Alishan représentent des zones de sources importantes pour la production du limon contenu dans les dépôts de lœss chinois (Derbyshire 1983a). En revanche, les travaux de Pye et Zhou (1989) indiquent également que la poussière qui compose les dépôts du lœss du plateau central en Chine est principalement transportée, par de forts vents du Nord-Ouest, depuis les déserts du Gansu et de la Mongolie. Ces vents sont générés par les ondes froides émanant du système sibérien à haute pression (Pye et Zhou 1989). Les matériaux plus grossiers sont déposés dans les déserts sablonneux de la Chine et du Sud de la Mongolie. Ils peuvent être remobilisés facilement par le vent pour être finalement incorporés dans des dépôts de lœss reconnaissables. Les études de Derbyshire et al. (1998) indiquent qu'une grande partie des matériaux contenue dans la masse de lœss du plateau chinois, provient de systèmes alluvionnaires qui couvrent le corridor Hexi du Gansu. Zhang et al. (1996) indiquent également que les déserts représentent une source importante pour une grande partie du limon contenue dans les dépôts du lœss chinois. Les observations les plus pertinentes relatives à l'origine désertique sont l'épaisseur du lœss et les tendances de la taille des particules.

D'un autre côté, l'étude géochimique de Liu et al. (1993) montre que l'altération chimique peut également jouer un rôle important dans la composition des sédiments contenus dans le lœss chinois.

La synthèse de l'étude bibliographique relative au lœss désertique de la Chine révèle que les particules limoneuses, principales composantes du lœss, sont sujettes de mécanismes d'altération et de transport dans les environnements arides et semi-arides. La production de matériaux de la taille du limon est donc le résultat de la fragmentation de débris grossiers. Cette production se fait éventuellement à travers: l'altération par le sel, insolation et altération, l'abrasion éolienne et éventuellement fluviale (Pye 1987 ; Assallay 1998).

Le lœss d'Asie centrale présente aussi un exemple du lœss désertique. Toutefois, pour certaines de ses régions, Smalley et Krinsley (1978) révèlent que les particules du limon ne sont pas toujours formées dans le désert. Ils avancent que leur origine est le résultat du broyage glaciaire et l'érosion par le gel dans les montagnes adjacentes (Tien Shan). Les particules produites sont ensuite transportées principalement par l'action fluviale dans la région désertique. Les auteurs ont montré que les altérations (mécanique et chimique) des

grains de sable au cours de leur transport peuvent produire de fines particules (6–2 μm). L'abrasion et le broyage glaciaire sont les principaux processus naturels qui transforment les particules de quartz de sable en un produit de taille limoneuse.

En Afrique, la présence du lœss est plus ou moins limitée. Toutefois, certains auteurs suggèrent que l'inventaire actuel du lœss dérivé du Sahara est incomplet (Coudé Gaussen 1987, Yaalon 1987). Les études les plus répondues du lœss de l'Afrique concernent les plateaux de Matmata en Tunisie (Coudé-Gaussen 1982), le lœss de Zaria au Nigeria (McTainsh 1987), et le lœss d'Îles des Canaries, Maroc, Égypte, Guinée et Cameroun (Rögner et al. 2004). En plus de sa présence de régions désertiques, des dépôts lœssiques sont identifiés dans les marges désertiques du Sahara (Coudé-Gaussen 1987). Ces dépôts sont minces et discontinus, et contiennent des quantités importantes du limon (McTainsh 1987).

- Dans l'Afrique de l'Ouest, Sedlmeyer (1964) indique que les vents d'Harmattan sont responsables du transport des sédiments du lœss contemporains sur environ 5 millions de km^2 . Au Nigeria, le lœss du versant du Sahara est d'origine du bassin du Tchad. Les matériaux sont transportés par le système éolien d'Harmattan et représentent la source des dépôts du lœss de Zaria dans la plaine de Kano au Nord du Nigeria (McTainsh, 1987).
- En Afrique du Nord, le lœss du plateau de Matmata (Tunisie) présente un exemple bien connu des gisements du lœss désertique en Afrique. Ce gisement atteint une épaisseur de 18 mètres à Téchine et contient jusqu'à cinq paléosols typiquement riches en smectite et en palygorskite. Ce lœss provient probablement des Sabkhas, du chott Djérid et du Grand erg Oriental (Tunisie) (Coudé-Gaussen et al. 1983).

Pour la production du limon dans les déserts, l'identification des dunes de sable comme source de grains du limon dans les dépôts du lœss peut soutenir ou réfuter différentes hypothèses. Dans la plupart des endroits, les dunes de sable sont composées de grains de sable bien triés, avec des quantités de grains de limon. Cette observation renforce l'hypothèse que l'abrasion éolienne des grains de sable est l'un des mécanismes importants pour générer des grains de limon dans les déserts (Whalley et al. 1982 ; Crouvi et al. 2010 ; Enzel et al. 2010). L'angularité rapportée aux grains du lœss du désert confirme cette hypothèse. Toutefois, certains travaux réalisés au laboratoire montrent que l'abrasion éolienne des grains de sable peut produire à la fois des grains de limon grossiers et fins (Whalley et al. 1982 ; Bullard et al. 2004).

Les dépôts lœssiques sont enregistrés dans divers déserts (Tableau I.2). Il se trouve en Afrique, Moyen-Orient, en Chine et en Australie. Un nombre croissant de dépôts du lœss dans ces régions deviennent maintenant évidents.

Tableau I.2. Documents ciblés pertinents pour des exemples du lœss désertique

Pays	Région	Épaisseur (m)	Référence
Egypte	Nord-est du Sinaï	12	Yaalon (1974)
Tunisie	Matmata	20	Coudé-Gaussen (1987)
Nigéria	Nord du Nigéria	-	Mc Thainch (1987)
Maroc	Oued de Massa	-	Grousset et al. (1992)
Libye	Plaine de Jefara (Tripoli)	-	Assallay et al. (1996)
Emirats Arabes Unis	Ras El-Khayma	04	Goudie et al. (2000)
Iran	Mashhad	12	Karimi et al. (2009)
Namib	Kaokoland	15	Brunotte et al. (2009)
Australie	Brachina Gorge	07	Haberlah et al. (2010)
Chine	Cagelebulu	06	Zhou et al. (2002)
Chine	Sishijiazi	08	Sun et al. (2018)

I.4 La présence du lœss dans le monde

Le lœss couvre environ 10 % de la surface en terre (Pecsi 1968). Les gisements les plus étendus se trouvent en Chine, Russie, Europe, Amérique du Nord et en Argentine. La figure (I.4) présente les principales régions de dépôts du lœss dans le monde (Pécsi 1990).

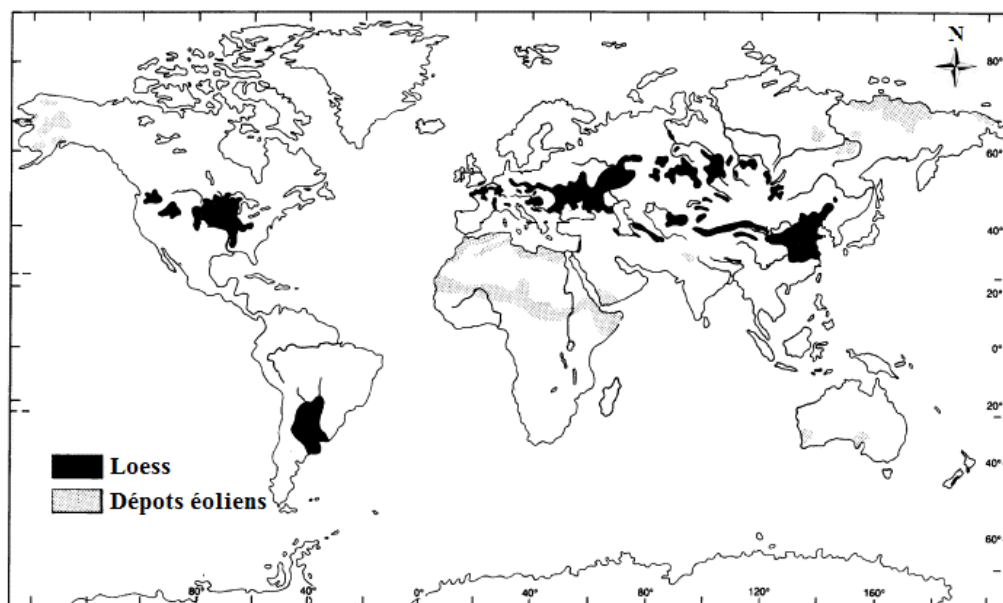


Figure I.4. Répartition du lœss à travers le monde (Pécsi 1990)

- En Asie, le lœss recouvre de vastes régions, en particulier dans la plus grande zone de latitude moyenne et semi-aride de l'hémisphère Nord (Figure I.5). Les dépôts du lœss les plus répandus en Asie se trouvent en Chine (Guo et al. 2002 ; Qiang et al. 2011). Ils sont largement répartis dans le Nord, le Nord-Ouest et dans le Sud-Est de la Chine. Il couvre d'environ 630 000 kilomètres carrés (6.6 % de la surface terrestre de la Chine). Son épaisseur varie entre 200 et 300 mètres (Lin et Liang 1982). Des épaisseurs supérieures à 300 mètres sont enregistrées près de Lanzhou en Chine (Derbyshire 1983a). La couverture du lœss la plus continue se trouve dans la partie centrale du Nord de la Chine, formant le lœss de plateau. Sur ce plateau, l'épaisseur varie de quelques dizaines à quelques centaines de mètres à des altitudes comprises entre 1000 et 1500 mètres (Muhs et al. 2014). En Asie centrale, le lœss est présent notamment au Tadjikistan, Kirghizistan, Turkménistan, à l'Ouzbékistan et au Kazakhstan. Dans certaines parties de la Russie, le dépôt du lœss dépasse 200 mètres d'épaisseur (Dodonov 1984, 1991).

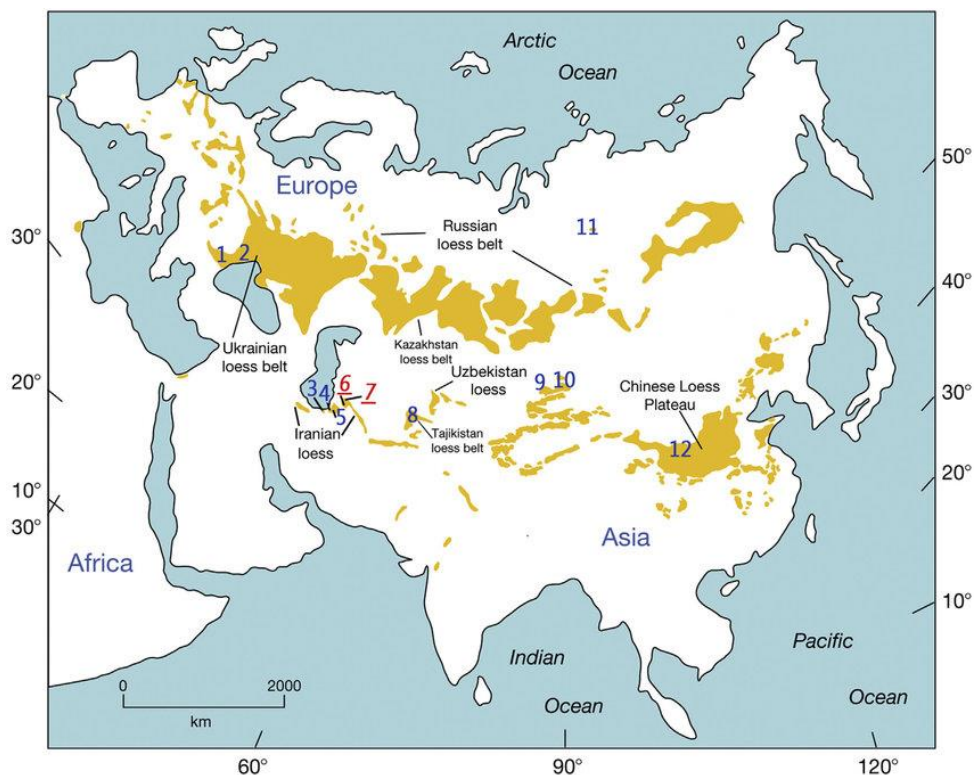


Figure I.5. Carte montrant la répartition du lœss en Asie (Ghafarpour et al. 2016)

- Au Moyen-Orient, le lœss le plus proéminent est situé dans le désert du Néguev. Il couvre une superficie de 5 500 km² (Yaalon 1974). Au Nord-ouest du Yémen, le lœss se trouve sur le plateau volcanique de Sana (Nettleton et Chadwick 1996 ; Wilkinson

1997). Il se trouve également aux Émirats arabes unis (Goudie et al. 2000) et dans le Nord de l'Iran (Ghafarpour et al. 2016).

- En Europe, le lœss couvre 65 % du territoire ukrainien (El Howayek et al. 2011). La ceinture du lœss de l'Ukraine s'étend vers l'ouest dans les Baltes, en Pologne et en Allemagne. D'importantes zones du lœss se trouvent dans le bassin du Danube, en Bavière le long du Rhin (Allemagne), en Belgique et dans le Nord de la France (Antoine 2002). Des prolongements localisés de la ceinture du lœss du Nord-ouest de l'Europe se trouvent aussi dans les îles anglo-normandes et le Sud de l'Angleterre (Smalley et Leach 1978 ; Catt 1985) (Figure I.6).

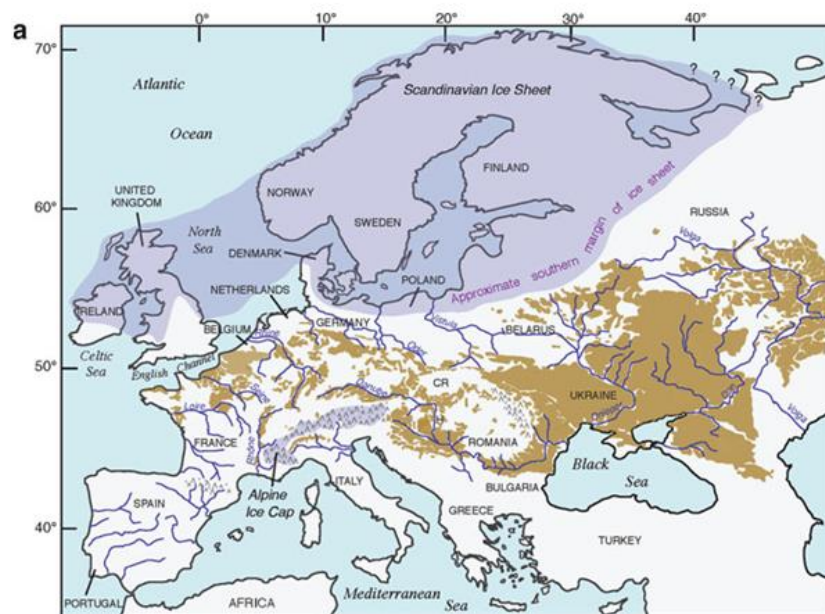


Figure I.6. La distribution du lœss en Europe (Muhs 2014)

- En Amérique du Nord, le lœss couvre de vastes zones du Nord-ouest des États-Unis, d'Alaska et des parties voisines du territoire du Yukon du Nord-ouest du Canada. Dans ces régions, l'épaisseur dépasse parfois les 60 mètres (Roberts et al. 2007).
- En Amérique du Sud, l'accumulation des dépôts du lœss couvre 30 % de la superficie totale de la région de Pampa en Argentine. L'épaisseur moyenne de ces sédiments est d'environ 30 mètres (Moll et al. 1989).

La figure (I.7) montre la distribution du lœss au Nord et au Sud de l'Amérique. On distingue en particulier le lœss du Mississippi, Palouse, la plaine de Snake, Alaska et le lœss des grandes plaines du Nord. Également, le lœss de Pampas, Chaco et le lœss du Paraguay au Sud.



Figure I.7. Répartition du lœss en Amérique du Nord et du Sud (Muhs et Zárata 2001)

- En Afrique, des dépôts du lœss existent en Tunisie, Libye, Nigeria, Namibie et en Égypte, etc. (Figure I.8) (Crouvi et al. 2010). En Afrique du Nord, le lœss désertique le plus étudié est celui du plateau de Matmata au Sud Tunisien (Coudé-Gaussen 1987 ; White et al. 2002). Le lœss Tunisien couvre une superficie estimée à 4 000 km². Il atteint des épaisseurs allant jusqu'à 20 mètres (Coudé Gaussen et al. 1987). En Libye, entre la plaine de Jeffara et le plateau Tripolitain, des gisements du lœss sont situés dans une chaîne montagneuse riche en carbonates. Ces gisements sont considérés comme une continuation du lœss Tunisien (Coudé-Gaussen 1987). Le lœss le plus connu dans le Sahel de l'Afrique est celui de Zaria. Il est situé dans les plaines de Kano dans le centre-nord du Nigeria (McTainsh 1987). Cette zone de climat tropicale couvre une superficie de 41 000 km². Elle est considérée comme l'une des plus grandes régions du lœss de désert connue dans le monde (McTainsh 1987). D'autres recherches révèlent la présence des dépôts lœssiques dans la ceinture discontinue orientée du Sénégal à travers la Guinée, le Mali, le Burkina Faso, le Niger et le Nigeria jusqu'au Nord du Cameroun (Li et al. 2020). En Afrique australe, le lœss se trouve principalement dans le Nord-ouest de la Namibie (Brunotte et al. 2009). Le lœss

namibien s'étend vers l'ouest dans l'océan Atlantique (Stuut et al. 2002). On trouve également des dépôts lœssiques dans les îles des Canaries.

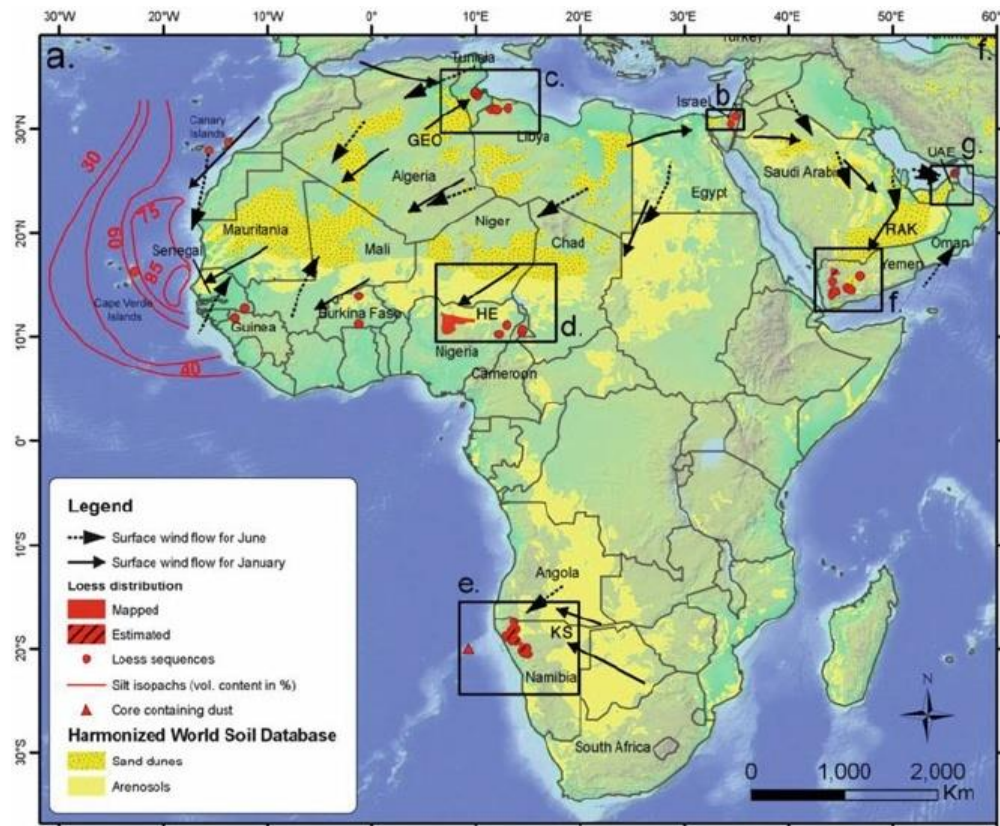


Figure I.8. Répartition spatiale du lœss en Afrique et au Moyen-Orient, mers sableuses actives et arénosols (sols sableux) (Crouvi et al. 2010)

- En Australie, la distribution du lœss est limitée. Butler et Hutton (1956) ont utilisé le terme 'Parna' pour désigner un type de dépôt dans le Sud de la nouvelle-Galles et le Nord de Victoria. Ce dépôt contenant de l'argile éolienne et considérée comme un lœss riche en argile (Hesse et Mctainsh 2003 ; Greene et al. 2009). Il existe deux principaux chemins de vents provenant des zones intérieures arides. L'un s'étend dans une direction Est-sud-est à travers les régions de l'Est jusqu'à la mer de Tasman, et l'autre s'étend vers le Nord-ouest à travers l'Australie-Occidentale jusqu'à l'océan Indien (Figure I.9). L'épaisseur du lœss australien varie généralement entre 1 et 3 mètres. Elle peut atteindre parfois des épaisseurs plus épais (Hesse et Mctainsh 2003 ; Muhs et al. 2014).

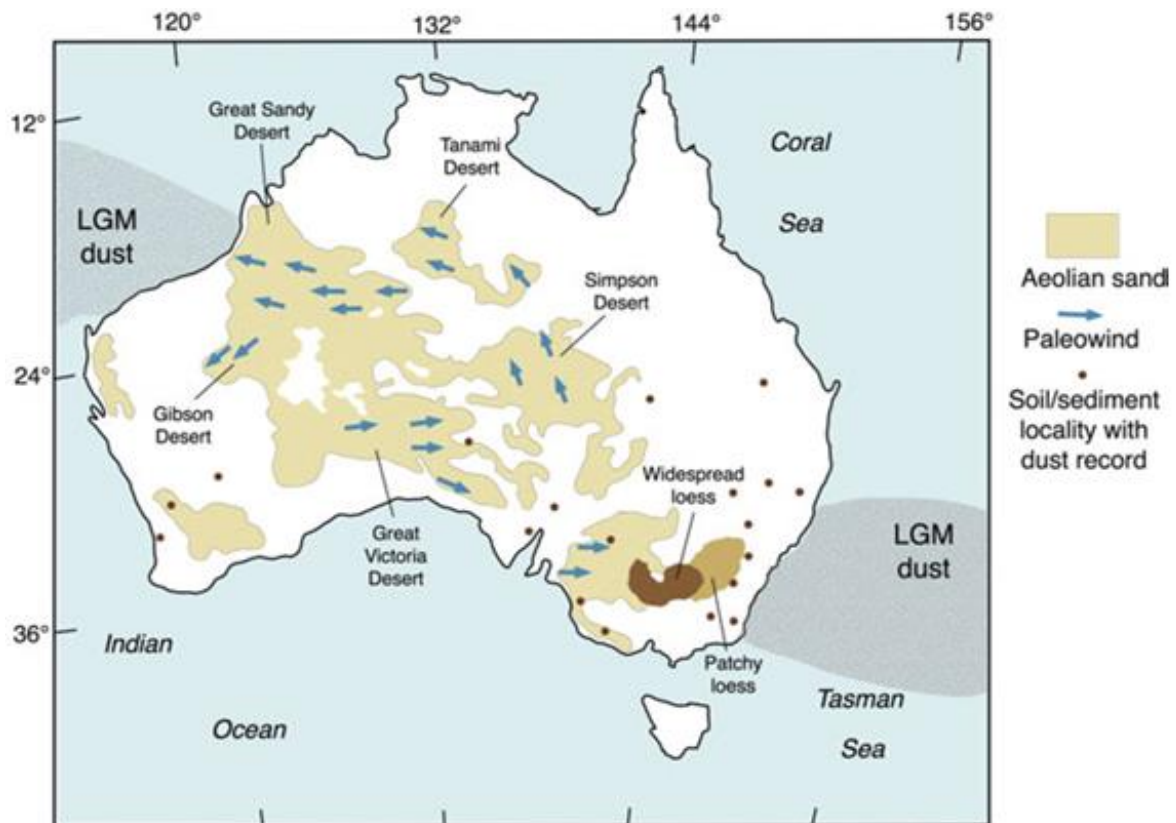


Figure I.9. Carte de l’Australie montrant la répartition des dépôts du lœss, sable éolien et la direction des paléo-vents (Hesse et McTainsh 2003)

- En Nouvelle-Zélande, les dépôts du lœss sont largement répandus dans les îles du Nord et du Sud (Figure I.10). Ces dépôts couvrent 10 % de la surface terrestre du pays (McCraw 1975). Sur l’Île du Nord, les dépôts du lœss les plus importants se trouvent dans la région de Manawatu. Des anciennes terrasses de plaines inondables à climat froid sont recouvertes de poussière provenant des cours d’eau voisins et des bassins d’Hawke’s Bay (Molloy 1998). Sur l’Île du Sud, les dépôts du lœss sont plus importants sur les hautes terrasses de la plaine de Canterbury, les terres basses du Nord et Sud de Canterbury, la péninsule de Banks, Sud d’Otago, et sur les plaines de Southland (Molloy 1998). L’épaisseur des dépôts lœssiques en Nouvelle-Zélande varie de 0.5 à 6 mètres. Elle peut atteindre un seuil de 20 mètres (Eden et Hammond 2003 ; Muhs et al. 2014).

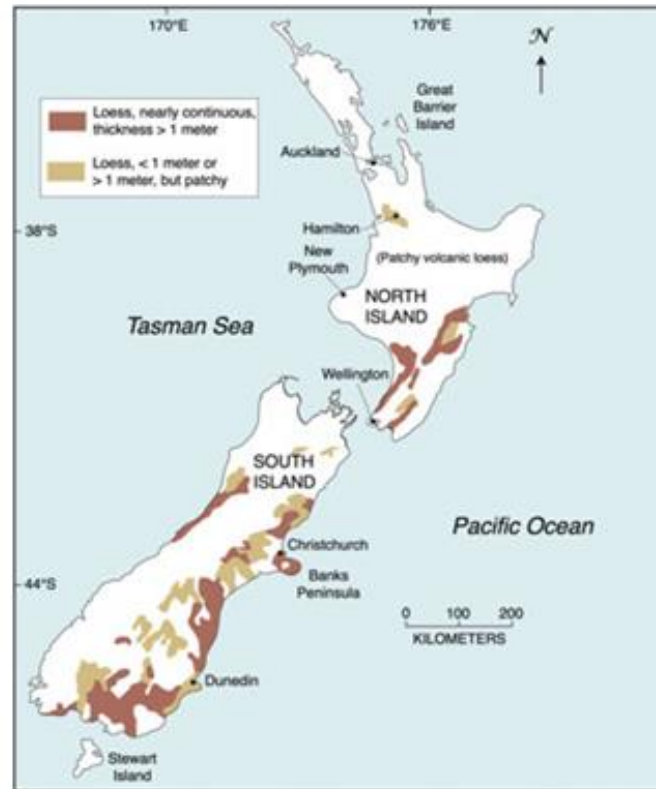


Figure I.10. Distribution du lœss en Nouvelle-Zélande (Eden et Hammond 2003)

I.5 Propriétés géotechniques du lœss à travers le monde

Le lœss a été étudié et examiné à travers plusieurs aspects, le plus important étant l'aspect géotechnique. Dans le domaine des études géotechniques, les principaux facteurs utilisés sont notamment la gravité spécifique, la densité sèche, la composition granulométrique, les limites d'Atterberg, la perméabilité et la collapsibilité.

I.5.1 Gravité spécifique

La gravité spécifique des sols est définie, comme étant le rapport de la densité de la partie solide d'un matériau à la densité de l'eau à 20 °C. Elle est sans unité et désignée par le symbole (G_s). De nombreux chercheurs ont noté que les valeurs de la gravité spécifique du lœss sont plutôt similaires dans plusieurs parties du monde. Le tableau (I.3) illustre la variation des valeurs de la gravité spécifique moyenne du lœss dans certaines régions du monde.

Tableau I.3. Valeurs de la gravité spécifique du lœss dans certaines régions du monde

Pays	Régions	G_s	$G_{s\ moy}$	Références
Chine	Shaanxi	2.71	2.70	Phoak 2018
	Xian	2.73		Zhang et al. 2008
	Gansu	2.66		Zhang et al. 2019
	Lanzhou	2.71		Jia et al. 2019
	Yuzhong	2.70		Li et al. 2019
Iran	Kopet Dagh	2.66	2.67	Shafiei et Dusseault 2008
	Gorgan	2.67		Hosseini et al. 2012
	Golestan	2.67		Yazarloo et al. 2017
Pologne	Lublin Upland	2.66	2.68	Grabowska-Olszewsk 1988
	Cracow-Częstochowa	2.71		
Royaume-Uni	Kent	2.68-2.70	2.69	Derbyshire et Mellors 1988
États-Unis	Iowa	2.68-2.72	2.69	Sheeler 1968 Parsons et al. 2009
	Nebraska	2.57-2.69		
	Tennessee	2.65-2.70		
	Mississippi	2.66-2.73		
	Alaska	2.67-2.79		
Lybie	Tahala	2.73	2.70	Assallay et al. 1996
	Gharyan	2.66		
	Khoms	2.68		
	Garaboli	2.67		
			2.69	

À travers la synthèse des résultats illustrés dans le tableau (I.3), il ressort que la valeur moyenne de la gravité spécifique du lœss dans le monde est environ 2.69.

À titre indicatif, la figure (I.11) illustre un exemple de mesures du paramètre de la gravité spécifique du lœss dans le monde. La valeur moyenne étant de 2.68 (Jing 1989).

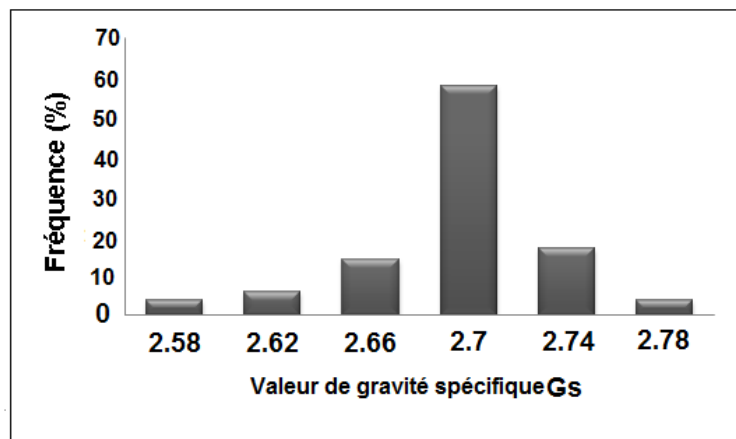


Figure I.11. Histogramme de 77 de mesures de la gravité spécifique du lœss dans le monde (Jing 1989)

La densité sèche des sols est définie comme étant le rapport de la masse sèche du sol à son volume. Elle est désignée par le symbole (ρ_d) et exprimée en (g/cm³). L'indice de vides noté par le symbole (e), exprime le rapport du volume de vides au volume du solide de l'échantillon.

Tableau I.4. Valeurs de la densité sèche et l'indice de vides du lœss dans différentes régions du monde

Du tableau (I.4), il ressort que la valeur moyenne de (ρ_d) est environ $1.44 \text{ (g/cm}^3\text{)}$. L'indice moyen de vides correspondant est de 0.83.

24

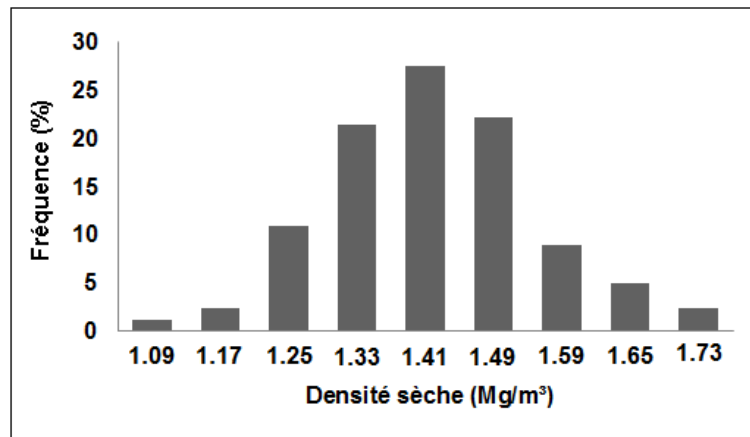


Figure I.12. Histogramme de 407 mesures de la densité sèche naturelle du lœss dans le monde (Jing 1989)

I.5.3 La granulométrie des grains du lœss

La granulométrie est l'ensemble des opérations qui permettent la répartition des grains du sol par classes de taille. Elle permet essentiellement de déterminer et repartir la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains d'un échantillon. Généralement, les sols lœssiques ont une granulométrie uniforme, constituée principalement de particules de limon avec de petites quantités de sable et d'argile (El Howayek et al. 2011). La figure (I.13) reflète la répartition uniforme du sol et les zones de lœss sableux, limoneux et argileux. À travers la synthèse des travaux publiés, des approches de classification sont proposées. Holtz et Gibbs (1951) et Gibbs et Holland (1960) distinguent trois types du lœss: un lœss sableux, limoneux, et argileux. Dans le cas où la teneur en sable dépasse 20%, Pye propose de désigner le matériau comme lœss sableux. Toutefois, dans le cas où le sédiment contient plus de 20% d'argile, il est décrit comme un lœss argileux (Pye 1987).

D'une manière générale, et en référence des travaux publiés sur le lœss dans le monde, la texture du lœss diffère remarquablement d'une région à l'autre. Dans le bassin du Missouri (USA), le lœss est composé principalement en majorité des grains de limon (Bell 1992). Il en est de même du lœss en Chine et celui de l'Angleterre (Derbyshire et Mellors 1988).

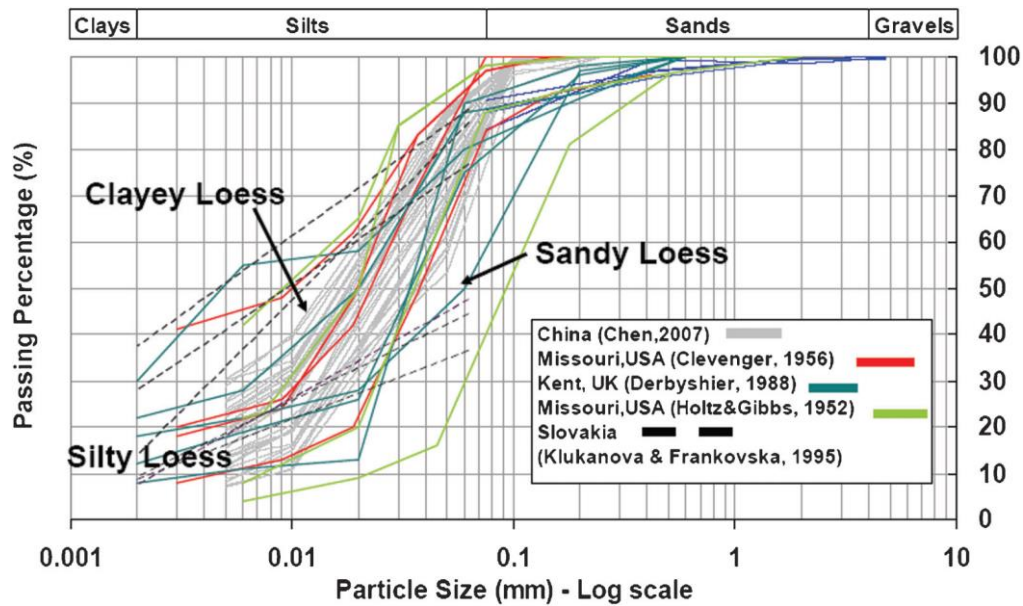


Figure I.13. Distribution de la taille des grains du lœss (Derbyshire et Mellors 1988 ; Sheeler 1968 ; Chen et al. 2007 ; El Howayek et al. 2011)

I.5.4 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont les teneurs en eau définissant la plasticité des sols. Ces limites sont la limite de liquidité (ω_l) et la limite de plasticité (ω_p). La limite de liquidité est la teneur en eau du sol marquant le passage de l'état liquide à l'état plastique. La limite de plasticité correspond au passage de l'état plastique à l'état solide. Ces deux limites sont exprimées en pourcentage. L'indice de plasticité, noté par I_p , est calculé par la différence entre (ω_l) et (ω_p).

Les travaux relatifs aux limites d'Atterberg indiquent que la limite de liquidité du lœss varie entre 25% et 35% et atteint parfois des valeurs exceptionnelles de 45%. L'indice de plasticité se trouve compris entre 5% et 22% (Gibbs et Holland 1960).

La figure (I.14) présente les caractéristiques de plasticité définies par Gibbs et Holland (1960). Elle montre trois types de zones de lœss: sableux, limoneux et argileux. Les lœss de faible limite de liquidité et de plasticité correspondant aux lœss sableux. Ceux qui ont des limites de liquidité et des indices de plasticité élevés sont les lœss argileux. Les lœss qui ont des valeurs intermédiaires des deux limites sont désignés comme lœss limoneux.

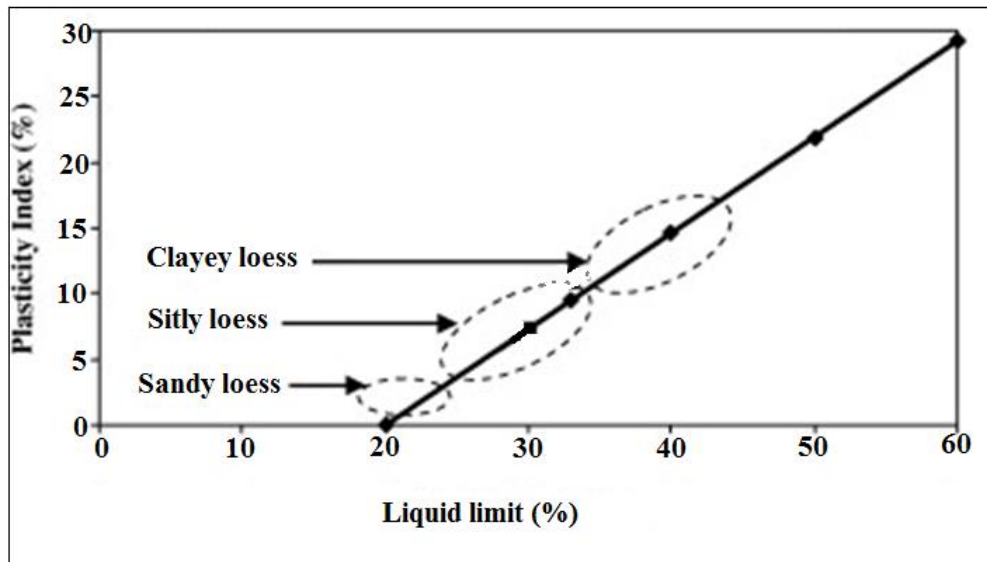


Figure I.14. Propriétés de plasticités du lœss définies par Gibbs et Holland (1960)

I.5.5 La perméabilité

La perméabilité du sol dépend de la vitesse d'infiltration de l'eau. Elle caractérise la capacité d'un sol à laisser pénétrer et circuler de l'eau. Elle est désignée par (K) et exprimée en (m/s). La perméabilité est un facteur important pour l'analyse de la stabilité des dépôts du lœss. Ce paramètre est déterminant dans l'évaluation de la vitesse d'écoulement, de la quantité d'infiltration et les forces de soulèvement sous les structures hydrauliques. Elle intervient dans le calcul des ouvrages souterrains (tunnels, excavations, fouilles, etc.) et dans l'étude des problèmes de protection des sols contre le risque de pollution.

La perméabilité du lœss est liée principalement à sa masse volumique sèche (Figure I.15) et son indice de vides.

Grâce à l'existence des trous verticaux des racines des plantes et aux joints de rétrécissement dans la masse du lœss, sa perméabilité verticale est plus grande que la perméabilité horizontale (Sheeler 1968).

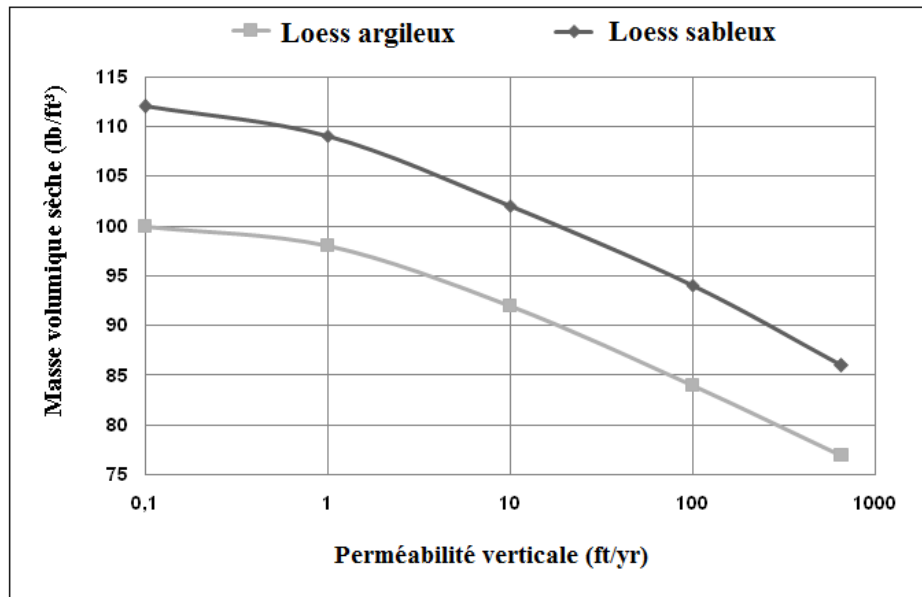


Figure I.15. Relation entre la masse volumique sèche et la perméabilité verticale des échantillons de la rivière de Missouri (USA) (Sheeler 1968)

I.6 L'effondrement du lœss

L'effondrement est un changement soudain de la structure du sol d'un état ouvert initial à un état dense final lorsque les liaisons particule-particule échouent en cas de mouillage ou de chargement. Cela se traduit par une réduction de volume significative. Ce phénomène peut se provoquer en cas de rupture par cisaillement, de migration des liaisons inter-particules et de perte des forces capillaires (Assadi Langroudi 2014). Pour estimer l'amplitude de l'effondrement, Jennings et Knight ont proposé la méthode du double oedomètre (Jennings et Knight 1957). En revanche, Gibbs et Bara ont proposé un critère d'effondrement simple basé sur la densité sèche et la limite de liquidité (Gibbs et Bara 1962).

Rogers (1995) ; Lin (1995) ; Bell et de Bruyn (1997) et Houston et al. (2001) ont discuté en détail des différentes formes de sols effondrables trouvés à travers le monde. Les plus couramment rencontrés sont les lœss. Les lœss sont généralement des sols métastables qui peuvent s'effondrer et s'affaisser lorsqu'ils sont chargés et mouillés. Ce comportement est appelé collapsibilité. Le phénomène de collapsibilité est principalement dû à la structure ouverte du sol liée à la cimentation faible entre les particules. Lors d'un mouillage, la cohésion inter-particulaire devient faible. Par conséquent, ladite cohésion peut dissoudre et provoque l'effondrement du sol. L'effondrement du lœss peut causer des dommages importants aux fondations et constitue une menace potentielle pour les structures des

bâtiments. Ce problème est décrit depuis longtemps dans les régions arides. Il est étudié et discuté également par plusieurs chercheurs.

Rogers (1995) a discuté de diverses propriétés associées aux sols affaissables. En effet, il a déclaré que certaines propriétés doivent être présentes pour que l'effondrement soit possible. Les caractéristiques typiques de la plupart des sols affaissables incluent (1) une structure ouverte métastable (2) une faible densité sèche et indice de vides élevé (3) une porosité élevée et (4) une faible force de liaison inter-particulaire intrinsèque.

Assallay et al. (1997) ont étudié la formation d'une structure ouverte dans un lœss et un effondrement pertinent à l'aide des échantillons préparés en laboratoire. Ils ont conclu que la nature des particules du lœss et la microstructure jouent un rôle important dans son effondrement structurel. En outre, ils ont déclaré que la taille des particules, l'un des paramètres structurels, est également un contrôle clé de l'effondrement structurel et d'autres effets connexes.

Miao et Wang (1990) ont proposé une hypothèse selon laquelle l'effondrement du lœss est causé par une certaine instabilité de sa microstructure.

Pour analyser la rupture de pente dans le lœss, Tu et al. (2009) ont développé une méthode basée sur une expérience de terrain à grande échelle et attribuaient les glissements de terrain induits par les précipitations à l'effondrement structurel.

Yuan et Wang (2009) ont tenté de lier l'effondrement avec le tassement sismique dans un lœss. Ils ont conclu que l'effondrement et le tassement sismique sont corrélés à sa microstructure métastable, mais avec différents mécanismes de déclenchement.

Giménez et al. (2012) ont caractérisé un lœss dans le centre de l'Espagne avec une perspective particulière dans l'analyse des microstructures. Cela est également noté par Rogers et al. (1994) qu'un changement dans le tassement des particules est au cœur de l'effondrement du lœss.

Deng et al. (2007) ont analysé une série d'images microstructurales des échantillons du lœss provenant de six sites différents. Ils ont constaté que les zones de pores du treillis et les distributions de tailles de particules sont bien corrélées avec le coefficient de subsidence sismique. Cependant, malgré ces efforts, la compréhension actuelle des mécanismes sous-jacents contrôlant le comportement d'effondrement du lœss et l'origine de l'effondrement reste controversée ou incomplète.

I.7 Conclusion

Le lœss est un dépôt éolien dominé par des particules de la taille du limon. Il contient également du sable, d'argile et de grains de carbonates. Du point de vue minéralogique, il se compose principalement de quartz, feldspaths, micas, carbonates et de minéraux argileux. Le lœss se trouve dans de vastes régions d'Asie, du Moyen-Orient, d'Europe, d'Amérique du Nord et du Sud, d'Afrique et d'Australie. La plupart des dépôts lœssiques ont des compositions similaires. Le lœss peut être dérivé de roches glaciaires et produit par l'interaction de plusieurs processus géologiques, principalement par l'abrasion des mouvements des glaciers continentaux. Il peut être également dérivé de processus désertiques et produit de la désagrégation des roches, essentiellement par l'abrasion éolienne des grains de sable. Le lœss présente un problème d'effondrement, ce qui peut provoquer des dommages importants aux structures.

Chapitre II

Rhéométrie et généralités sur
la rhéologie des fluides

II.1 Introduction

La rhéologie est la science de déformation et de l'écoulement de la matière. Cette science repose sur les bases de la mécanique des milieux continus, dont l'objet est de déterminer les contraintes et les déformations en chaque point d'un milieu continu. Elle consiste à déterminer la relation qui relie la contrainte de cisaillement au taux de déformation. Cette relation peut être linéaire ou non-linéaire. Les matériaux étudiés par les rhéologues sont extrêmement divers :

- 1) Suspensions : peintures, boues de forage, bétons, plâtres, sang, minerais, etc. (Barnes 1999 ; Viguerie 2009 ; Kudaikulova 2015).
- 2) Emulsions : Sauces alimentaires, cosmétiques, médicaments, etc. (Alvarez 2006 ; Derkach 2009 ; Ochowiak et al. 2012; Kwak 2015).
- 3) Fluides complexes : polymères, adhésifs, fluides biologiques, mousses, matériaux granulaires, poudres, etc. (Weaire 2008 ; Roselli et Diller 2011 ; Rueda 2017).

Le présent chapitre constitue une synthèse bibliographique de la rhéologie. Il est divisé en trois sections. La première section présente des généralités sur la rhéologie des fluides. La deuxième section traite la rhéométrie et les typologies des rhéomètres. Enfin, la dernière section décrit la rhéologie du lœss et ses applications.

II.2 Généralités sur la rhéologie

II.2.1 Définition de la rhéologie

La rhéologie vient des termes grecs 'Rheo' qui signifie écoulement 'Couler' et 'Logos' qui désigne 'l'étude d'un domaine'. La création du mot rhéologie est attribuée à Bingham en 1921. Il a défini la rhéologie comme la science des déformations et des écoulements de la matière (Chateau 2014). La rhéologie est une science pratiquement identique à la mécanique des milieux continus, dont l'objet est d'observer, décrire et modéliser les déformations de la matière, sous l'action de différentes forces. De nos jours, la rhéologie se distingue par son caractère essentiellement pluridisciplinaire. Elle s'intéresse plus particulièrement aux comportements non linéaires des matériaux à l'état solide, à l'état fluide et lors des transitions entre les deux états (Chateau 2014). Elle consiste à relier les propriétés macroscopiques et les propriétés microscopiques des matériaux (composition, interactions entre constituants, structurations, etc.).

À travers les paramètres et l'équation rhéologique, l'équation d'état est déterminée. Cette équation permet de connaître le comportement du fluide ou du mélange examiné. Les

propriétés rhéologiques des matériaux sont déterminées expérimentalement à l'aide des viscosimètres ou des rhéomètres. L'équation rhéologique d'état est la relation entre la contrainte de cisaillement (τ) et la vitesse de cisaillement (γ), qui est représenté par $\tau = f(\gamma)$.

II.2.2 Écoulement de cisaillement simple

Un simple exemple de cisaillement est un mouvement d'un échantillon entre deux surfaces planes, l'une au repos et l'autre en déplacement parallèle à elle-même (Azouz 2010). La figure (II.1) montre un schéma représentatif d'un écoulement de cisaillement simple.

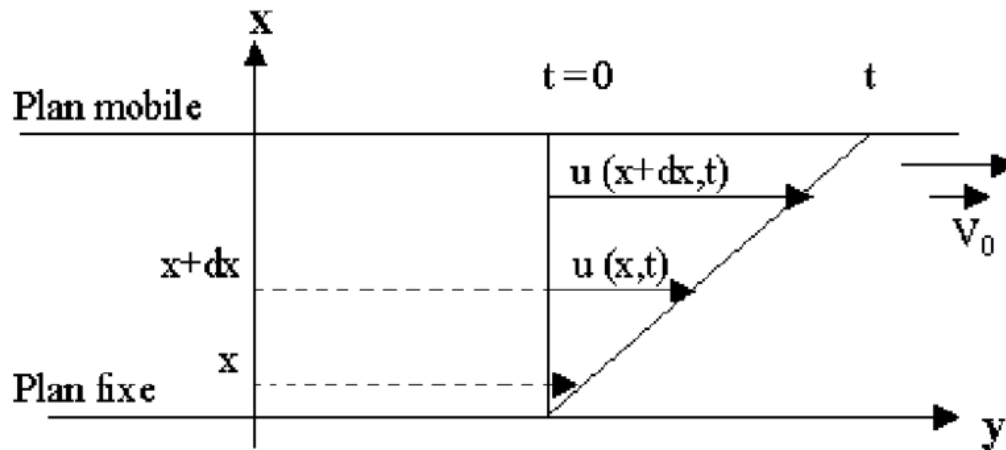


Figure II.1. Schéma représente l'écoulement de cisaillement simple

Dans un écoulement de cisaillement simple (Figure II.1), le fluide est contenu entre deux plans parallèles. Le plan inférieur est immobile et le plan supérieur est entraîné avec une vitesse déterminée. À l'instant t , chaque particule parcourt la distance $u(\Delta x, t)$ dans une section droite. On définit la vitesse de cisaillement V :

$$V = \frac{du}{dt} \text{ (m/s)} \quad (\text{Pa.s}^n) \quad (\text{II.1})$$

Le gradient de vitesse γ est défini par :

$$\gamma = \frac{dV}{dx} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (\text{II.2})$$

II.2.3 Grandeurs fondamentales de la rhéologie

II.2.3.1 Contrainte de cisaillement

Une des grandeurs fondamentales de la rhéologie est la contrainte de cisaillement. Durant un mouvement de cisaillement laminaire, les couches sont animées d'un mouvement relatif les

unes par rapport aux autres. La contrainte de cisaillement (τ) résulte de la force de frottement (F) qui est exercée tangentielllement à la surface de la couche. Elle est donnée par la relation suivante (Guy et al. 2014):

$$\tau = \frac{F}{S} \text{ (N/m}^2\text{) (Pa)} \quad (II.3)$$

Le terme $\frac{F}{S}$ indique la contrainte à unité ‘force/surface’. La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau. La contrainte de cisaillement qui constante en tout point de la même couche, varie généralement d’une couche à l’autre (Jean-Luc 2013).

II.2.3.2 Gradient de vitesse

Le gradient de vitesse $\frac{dv}{dx}$ est une mesure de la variation de la vitesse par la laquelle les couches intermédiaires se déplacent l’une par rapport à l’autre. Il décrit le cisaillement que subit le liquide. Il est appelé aussi taux de cisaillement. Son unité de mesure est (s^{-1}).

La vitesse de cisaillement (γ) est le rapport entre la vitesse d’écoulement v et l’épaisseur du fluide H . Elle est donnée par la relation suivante :

$$\gamma = \frac{v}{H} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (II.4)$$

II.2.3.3 La viscosité

La viscosité représente la résistance à l’écoulement d’un système soumis à une contrainte tangentielle. La connaissance de cette grandeur physique est une opération primordiale dans l’étude rhéologique d’un fluide (Vlachopoulos et Polychronopoulos 2012).

On suppose deux plans parallèles de fluides de surfaces S séparés par une distance dx . Ils se déplacent dans la même direction à des vitesses différentes V_1 et V_2 . Newton suggère que la force nécessaire pour maintenir cette différence de vitesse est proportionnelle à la différence de vitesse à travers le liquide ou gradient de vitesse. Pour exprimer cela, Newton a proposé (Kazemian 2010):

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (II.5)$$

η est appelé coefficient de viscosité dynamique. Elle est constante pour un matériau donné.

Dans le système international, l’unité de la viscosité, est le (Pa.s) ou Poiseuille (PI).

On peut définir également la viscosité dynamique apparente et la viscosité cinématique.

Viscosité dynamique (Apparente):

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \text{ (Pa.s) (PI)} \quad (II.6)$$

Viscosité cinématique :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad (II.7)$$

a) Mesure de la viscosité

Par moyens de viscosimètres, la viscosité des fluides peut être mesurée de plusieurs façons. Les viscosimètres couramment utilisés sont le viscosimètre du Couette et le viscosimètre à chute de bille.

a.1) Viscosimètre de Couette

Le viscosimètre du Couette est un viscosimètre à rotation. La figure (II.2) illustre l'expérience du Couette : soit deux cylindres coaxiaux de rayons différents séparés par un fluide. L'entraînement du cylindre extérieur avec une vitesse angulaire constante ω , engendre un effet sur le cylindre intérieur qui a tendance de tourner dans le même sens. Pour le maintenir immobile, il faut lui appliquer un couple opposé.

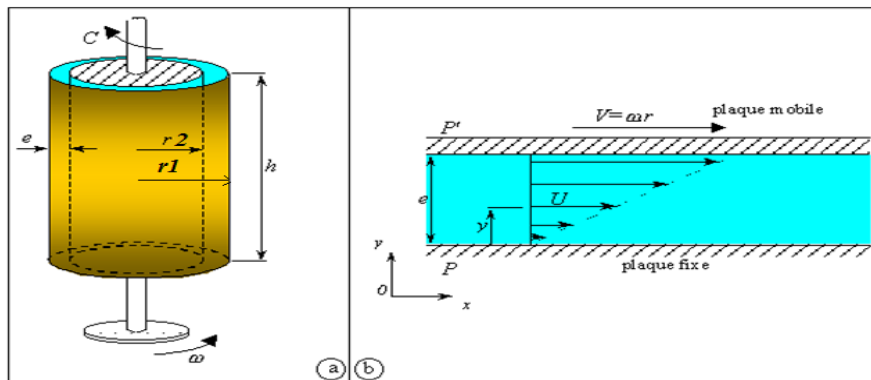


Figure II.2. Expérience de Couette

On tenant compte des considérations géométriques du système (R_1 et R_2 les rayons respectifs des deux cylindres et ' e ' la différence $R_1 - R_2$, qui est considéré comme étant petit de telle façon que l'on puisse considérer la répartition des vitesses comme linéaire entre les cylindres), Couette a observé que la force de frottement est proportionnelle au gradient de vitesse.

Soit :

$$F = \eta \frac{Sv}{e} \quad (II.8)$$

η : Viscosité dynamique du fluide.

$\frac{v}{e}$: Gradient de vitesse.

Si on la rapporte à l'unité de surface, cette contrainte de frottement est de :

$$\tau = \frac{F}{S} = \eta \frac{v}{e} \quad (II.9)$$

L'expérience de Couette permet la mesure du coefficient de viscosité par la mesure du couple C.

$$C = R_2 S \tau = R_2 S \eta \frac{v}{e} \quad (II.10)$$

Avec:

$$S = 2\pi R_2 h \quad (II.11)$$

$$v = \omega R_1 \quad (II.12)$$

On obtient la viscosité:

$$\eta = \frac{Ce}{2\pi R_2^2 R_1 h \omega} \quad (II.13)$$

a.2) Viscosimètre à chute de bille

Selon le principe de la loi de Stokes, le viscosimètre à chute de bille détermine la viscosité des fluides. Dans un liquide de masse volumique ρ' , le dispositif permet de mesurer la vitesse limite de chute V d'une sphère de diamètre D et de masse volumique ρ . La viscosité η est donnée par : (Estellé et al. 2013)

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)g D^2}{18V} \quad (II.14)$$

II.2.4 Types des fluides

Dans le domaine des études rhéologiques, il existe trois catégories de fluides : les fluides newtoniens, les fluides non-newtoniens et les fluides viscoélastiques.

II.2.4.1 Fluide Newtonien

Les fluides newtoniens sont les fluides les plus simples. Ces fluides obéissent à la loi de viscosité de Newton donnée par l'équation (II.13). L'équation représente la relation linéaire entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement (Tixier 2003). La viscosité est constante et indépendante de la vitesse de cisaillement (Gibouin 2015).

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (II.15)$$

Où :

τ : La contrainte de cisaillement.

η : La viscosité apparente.

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement.

La représentation graphique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement est donc une ligne droite qui passe par l'origine (Figure II.3). La pente de la droite donne la valeur de la viscosité du fluide. Les fluides newtoniens peuvent être représentés par un rhéogramme comme le montre la figure (II.3) ci-dessous. Des exemples de fluides newtoniens sont l'eau, les huiles végétales, le lait, etc. (Schramm 2000 ; Shah 2008).

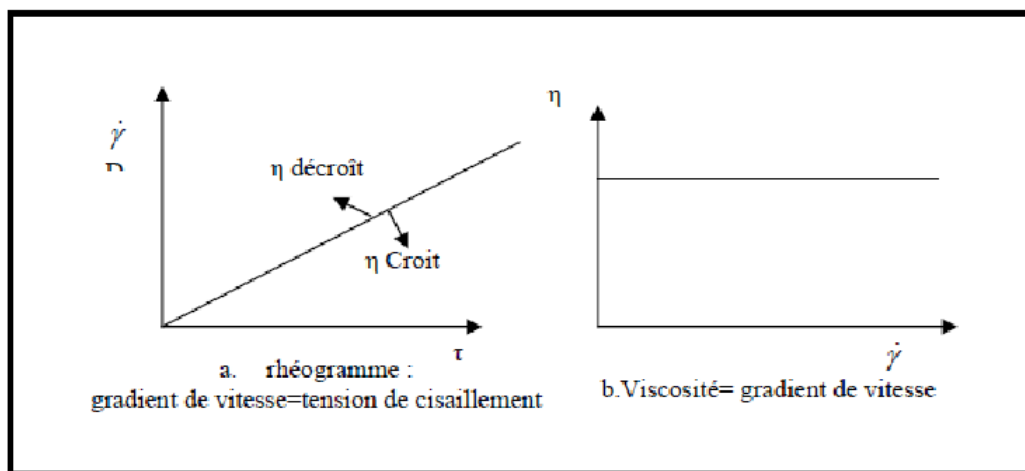


Figure II.3. Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité dynamique d'un fluide newtonien en fonction de la vitesse de cisaillement (Chabane 2009)

II.2.4.2 Fluides non-Newtonien

Tous les fluides qui ne répondent pas aux critères des fluides newtoniens sont classés comme fluides non-newtoniens. Dans les fluides non newtoniens, la viscosité n'est pas constante et varie en fonction du taux de cisaillement. La relation étant non linéaire entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement (Cheng 1998).

Les fluides non-newtoniens sont classés principalement en deux catégories : les fluides indépendants du temps et les fluides dépendants du temps.

a) Fluides non-newtoniens indépendants du temps

Les fluides non-newtoniens indépendants du temps sont subdivisés en trois groupes, lesquels sont caractérisés par des comportements rhéologiques distincts. Ils sont les suivants :

a.1) Fluide rhéofluidifiant

Le fluide rhéofluidifiant est caractérisé par une diminution de la viscosité apparente lorsque le gradient de vitesse augmente (Figure II.4). Ce genre de comportement d'écoulement est parfois appelé 'pseudo-plastique' (Ali 2016). Les exemples les plus connus des fluides non-newtoniens sont la peinture, les émulsions et les dispersions (Azouz 2010).

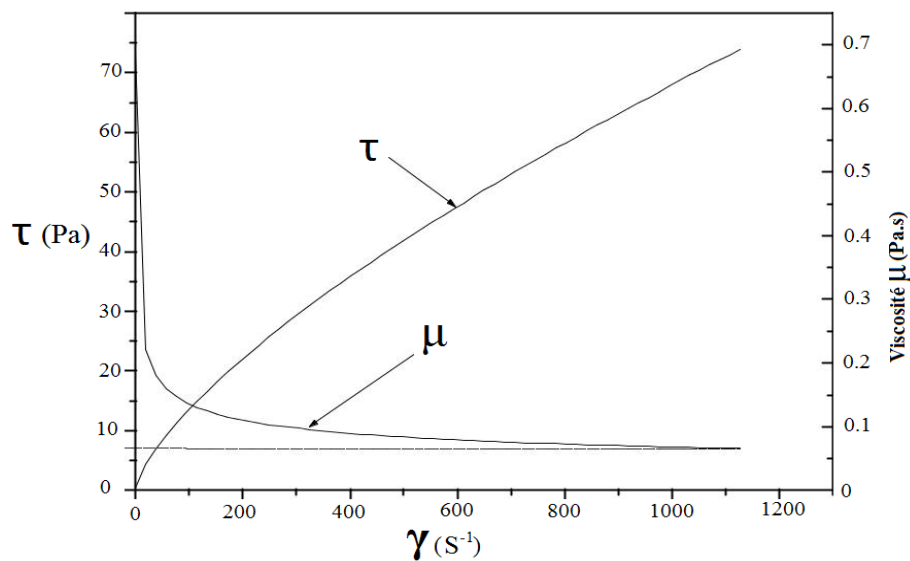


Figure II.4. Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour un fluide rhéofluidifiant

a.2) Fluide rhéoépaississant

Les fluides rhéoépaississants sont des fluides dont la viscosité apparente augmente en fonction de la vitesse de cisaillement (Figure II.5). Le rhéoépaississant est également connu sous le terme 'dilatant' (Taïbi 2017). Ce type de fluide est plus rare que les fluides rhéofluidifiants (Gnambo 2015). L'épaississement est fréquemment observé dans les

fluides contenant un haut taux de solides défloculés, comme les boues d'argile, les composés sucrés, la fécule de maïs dans l'eau et l'eau sablonneuse.

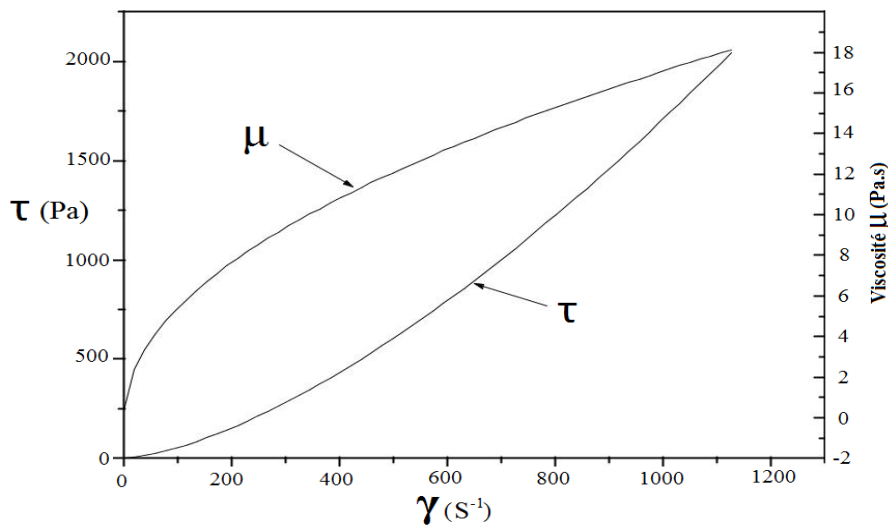


Figure II.5. Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour le fluide rhéoépaississant

a.3) Fluide à contrainte seuil

Ce type de fluide est caractérisé par une contrainte de cisaillement seuil (τ_c) en dessous de laquelle l'écoulement n'est pas possible. Autrement dit, lorsqu'ils sont soumis à une contrainte très faible, leur viscosité est tellement forte qu'il ne peut pas s'écouler. La viscosité diminue ensuite si une contrainte supérieure au seuil est appliquée (Khelfallah 2007).

Les fluides à seuil sont des fluides complexes. Généralement, ils sont des suspensions concentrées de particules solides dans un solvant. Au repos, ces particules s'organisent en une microstructure qui confère à la suspension un comportement de solide. Une fois que la microstructure est suffisamment désorganisée sous l'effet des forces extérieures, la suspension aura un comportement fluide.

Quant exemples de fluides à contrainte seuil incluent les mousses, les polymères, les suspensions d'argile, les peintures, les aliments, etc. (Barnes 1999).

a.4) Modèles rhéologiques

Pour les fluides du comportement non newtonien, on distingue couramment deux types : (1) fluides à contrainte critique (fluides du type Bingham et fluides du type Herschel-Bulkley), (2) fluides sans contrainte critique (fluides de type pseudo-plastique d'Ostwald-de Waele (loi de puissance)) (Nehdi et Rahman 2004).

a.4.1) Modèle de Bingham

Le fluide Binghamien correspond au liquide plastique idéal. Pour ce type de fluide, la contrainte de cisaillement varie linéairement avec la vitesse de cisaillement (Pévère 2006). À la différence des fluides newtoniens, le fluide Binghamien requière une force minimale pour le mettre en mouvement. Cette force correspond à la contrainte limite (critique) de cisaillement (Figure II.6). L'équation rhéologique d'état de ce modèle est caractérisée par deux constantes (τ_0 , η_B) (Khelifi 2018):

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \gamma \quad (II.16)$$

Avec :

τ_0 : Seuil d'écoulement (Contrainte seuil) (Pa).

η_B : Viscosité plastique (de Bingham) (Pa.s).

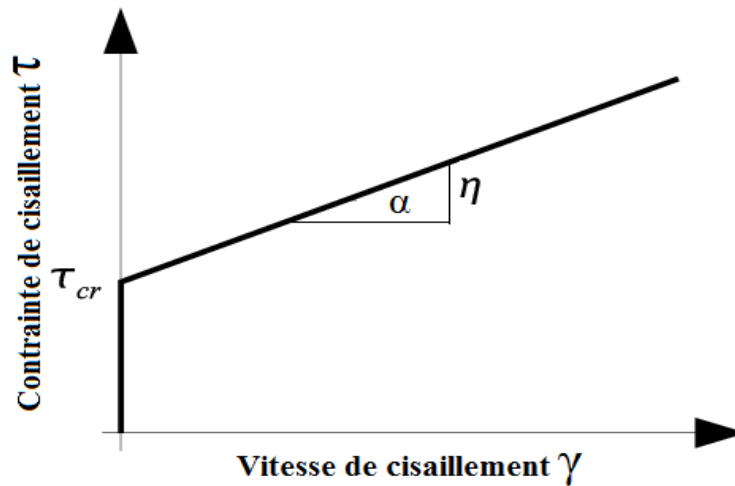


Figure II.6. Rhéogramme d'un fluide de type Bingham

a.4.2) Modèle d'Herschel-Bulkley

Le modèle d'Herschel-Bulkley est couramment utilisé pour décrire la plupart des fluides plastiques. La courbe d'écoulement de tels fluides devient rectiligne au-delà d'une certaine contrainte critique (Figure II.7). L'équation rhéologique du modèle est donnée par la formule suivante (Sochi 2010):

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (II.17)$$

τ_0 : Seuil d'écoulement (Pa).

K : La consistance de fluide.

n : L'indice de comportement (-).

- Lorsque $n < 1$ (rhéofluidification), η décroît quand γ croît.
- Dans le cas contraire quand, $n > 1$ (rhéopaississement), η croît avec γ .

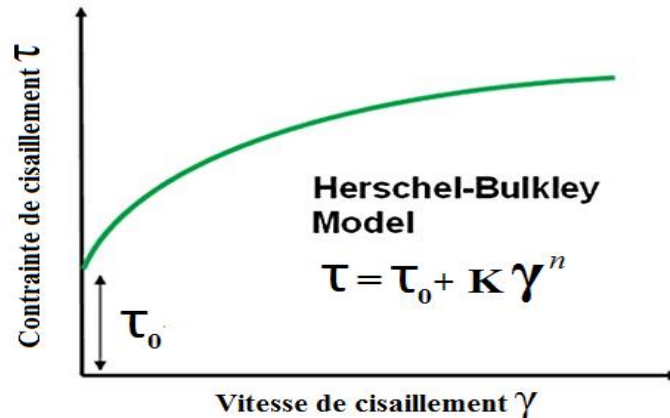


Figure II.7. Rhéogramme d'un fluide du type Herschel-Bulkley

a.4.3) Modèle d'Ostwald-de Waele (loi de puissance)

Le modèle d'Ostwald-de Waele est une loi de puissance décrit par la relation (Azouz 2010):

$$\tau = k\gamma^n \quad (II.18)$$

k : représente la consistance du fluide et n l'indice de fluidification.

- Lorsque $n < 1$ (rhéofluidification), η décroît quand γ croît.
- Quand $n > 1$ (rhéopaississement), η croît avec γ .
- Pour $n=1$, on retrouve le fluide Newtonien.

a.4.4) Modèle de Cross

Ce modèle tient compte des limites du comportement rhéologique. Aux faibles contraintes de cisaillement, on observe généralement un comportement Newtonien avec un plateau de viscosité appelée viscosité à cisaillement nul et désignée par η_0 (Pa.s). Au cisaillement élevé, un deuxième plateau apparaît et la viscosité est appelé viscosité à cisaillement infini désignée par η_∞ (Pa.s) (Rigal 2012).

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (\lambda\gamma)^n} \quad (II.19)$$

λ et n sont des constantes, λ est un temps caractéristique de relaxation. η_0 et η_∞ sont les viscosités respectives à cisaillement nul et infini.

La figure (II.8) regroupe l'ensemble des différents comportements rhéologiques usuels.

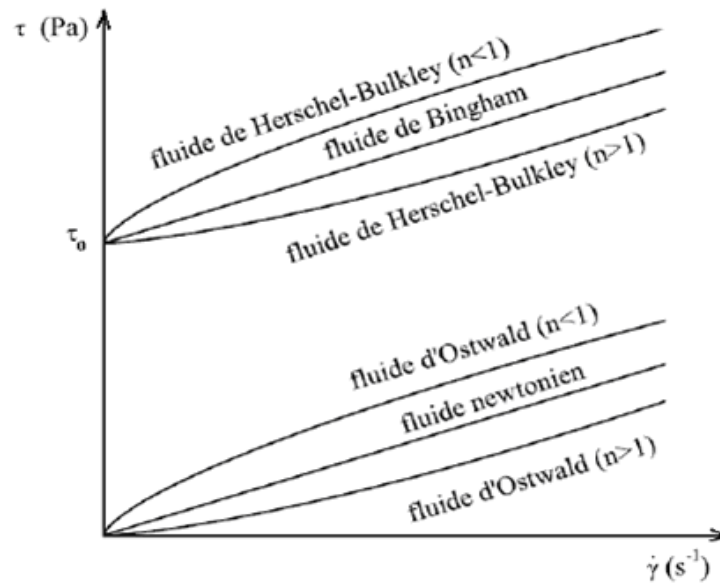


Figure II.8. Lois de comportement rhéologique usuelles (Azouz 2010)

Certains fluides peuvent avoir une variation du comportement d'écoulement avec le temps.

b) Fluides non-newtoniens dépendants du temps

Certains fluides non-newtoniens possèdent des comportements rhéologiques dépendant du temps. Ces fluides sont les fluides thixotropiques, les fluides anti-thixotropiques et les fluides viscoélastiques.

b.1) Fluides thixotropiques

La thixotropie est définie comme étant la variation de la vitesse de cisaillement (taux de cisaillement) avec le temps lorsque le fluide est soumis à une contrainte de cisaillement constante. Ce phénomène est expliqué par une rupture progressive de la structure des particules sous cisaillement (Barnes et al. 1989 ; Dullaert & Mewis 2005 ; Mewis & Wagner 2009). Une fois le cisaillement est supprimé, un comportement réversible est possible. Au repos, le fluide retrouve sa structure initiale (restructuration). Aux taux de cisaillement croissants, les liaisons qui forment ses réseaux physiques sont progressivement rompues. Cette rupture provoque inévitablement une diminution progressive de la viscosité jusqu'à atteindre un niveau d'équilibre. Toutefois, en l'absence de cisaillement et progressivement au cours du temps, ses réseaux se reconstituent de nouveau (Benslimane 2012).

Il existe deux classifications de ces fluides, thixotropes et anti-thixotropes ou rhéopexes (Steffe et Daubert 2006) : les fluides thixotropes présentent une diminution de la viscosité avec le temps sous un taux de cisaillement constant (Abu-Jdayil 2003). Les boues de forage,

peintures, produits cosmétiques, produits pharmaceutiques et graisses sont des exemples bien connus des fluides thixotropiques (Sadeqi et al. 2011). En revanche, les fluides rhéopexes sont les fluides qui présentent, sous un taux de cisaillement constant, une augmentation de la viscosité avec le temps (Benslimane 2012).

La thixotropie d'un fluide apparait à travers des boucles d'hystérésis (Figure II.9). Ces boucles sont le résultat de la présentation du rhéogramme $\tau = f(\dot{\gamma})$ en faisant croître puis décroître régulièrement la contrainte afin de revenir à la valeur initiale. On réalise ainsi ce qu'on appelle une "charge" puis une "décharge".

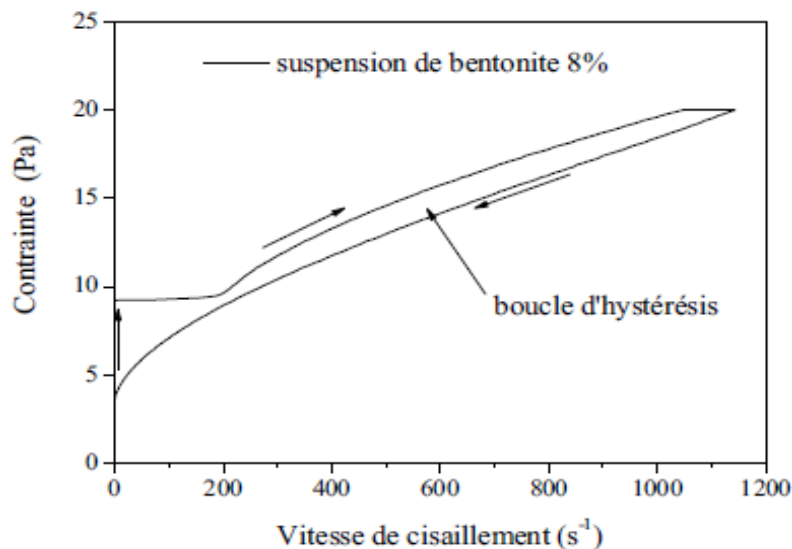


Figure II.9. Exemple d'une boucle d'hystérésis

b.2) Fluides anti-thixotropiques

Contrairement aux fluides thixotropiques, la viscosité des fluides anti-thixotropiques croît avec le temps. Ces fluides retrouvent aussi leurs viscosités initiales à l'arrêt de la contrainte de cisaillement.

II.2.4.3 Fluides viscoélastiques

La viscoélasticité est un comportement non newtonien très important et très fréquent dans certaines solutions. Pour ces solutions, la réponse du fluide à une déformation présente à la fois un aspect élastique (contrainte proportionnelle à la déformation) et un aspect visqueux (contrainte proportionnelle à la vitesse de déformation). Les fluides viscoélastiques manifestent un comportement intermédiaire entre celui d'un solide parfaitement élastique et celui d'un liquide visqueux (Guazzelli 2001).

Un liquide visqueux se déforme en continu sous l'influence d'une contrainte. Lorsque la contrainte appliquée est supprimée, ce type de liquide ne revient pas à son état d'origine. Pour ce type de fluides dont la déformation reste résiduaire et permanente, l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. L'écoulement des liquides visqueux est décrit par la loi de Newton. Par analogie à la mécanique, le comportement est représenté par un amortisseur donné dans la figure (II.10).

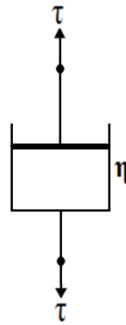


Figure II.10. Amortisseur représentant le comportement visqueux du fluide

En revanche, le système élastique qui se déforme sous l'influence d'une contrainte, restitué son état d'origine dès que la contrainte appliquée est supprimée. Il stocke et dissipe une partie de l'énergie. Ce type de fluide est dû à sa capacité de stockage et de la restitution de son énergie. Les réponses élastiques sont décrites par la loi de Hook, qui constitue une relation linéaire entre la contrainte et la déformation, comme le montre l'équation (II.18) (Sultan 2012).

$$\tau = G\gamma \quad (II.20)$$

Où :

G : Module d'élasticité.

γ : La déformation.

Le comportement élastique peut être représenté par un ressort qui est illustré dans la figure (II.11).



Figure II.11. Ressort représentant le comportement élastique

Les matériaux viscoélastiques sont capables de présenter simultanément des propriétés visqueuses et élastiques. Les huiles brutes, les polymères fondus, les caoutchoucs, la graisse, le sang, dentifrice, ketchup et les pâtes sont des exemples des fluides viscoélastiques. Leurs propriétés dépendent largement de la température et de la fréquence. Cela signifie que dans une certaine plage de fréquences et de température, ils peuvent présenter un comportement solide. Tandis que pour une autre plage de fréquences et de température, ils présentent un comportement liquide ou une combinaison des deux. Les fluides viscoélastiques sont caractérisés par le module complexe $G = G' + iG''$, dont la partie réelle peut être identifiée avec le stockage d'énergie et la partie imaginaire avec la perte d'énergie (Sultan 2012). Les propriétés viscoélastiques peuvent être étudiées par analyse dynamique et par des essais de fluage.

a) Essais de la viscoélasticité

Le comportement viscoélastique peut être modélisé par caractérisation à l'aide de trois types d'essais (Guy et al. 2014 ; Phan-Thien et Mai-Duy 2017) :

- **Le fluage $f(t)$** : est la déformation subie par le matériau lorsqu'on impose à ce dernier une contrainte d'amplitude unité à l'instant initial $t=0$. La contrainte est maintenue constante au cours du temps.
- **La relaxation de contrainte $G(t)$** : est la contrainte résultante de l'application d'une déformation d'amplitude unité à l'instant initial $t=0$. La déformation est maintenue constante au cours du temps.
- **Les sollicitations dynamiques (oscillations)** : l'application d'une contrainte ou déformation sinusoïdale, en déduire le module de conservation G' et le module de perte G'' .

a.1) Essai de fluage et relaxation

L'essai de fluage permet une meilleure compréhension des comportements rhéologiques des matériaux viscoélastiques en accédant à leurs propriétés dans des conditions proches de celles de l'état de repos. En effet, le test consiste à appliquer une contrainte constante inférieure au seuil d'écoulement du fluide puis de suivre l'évolution de la déformation engendrée au cours du temps. La relaxation du matériau s'opérant après la suppression de la contrainte correspond à la recouvrance. Cette dernière permet de récupérer tout ou partie de cette déformation.

Dans le cas d'un solide élastique, la déformation est proportionnelle à la contrainte. La déformation s'annule avec la suppression de la contrainte : la déformation élastique est totalement récupérable. Dans le cas d'un fluide visqueux, si on ramène la contrainte à zéro, la déformation demeure constante et égale à sa valeur à l'instant de la suppression de la contrainte. Un comportement viscoélastique se trouve à la frontière de ces deux cas-limites. La figure (II.12) présente ce type de comportement. Le suivi de la recouvrance permet le contrôle du niveau de relaxation du matériau. Les essais de fluage présentent aussi l'intérêt de permettre le calcul du seuil d'écoulement (Benslimane 2012). D'après l'auteur, le fait d'appliquer des essais de fluage successifs par valeur croissante de la contrainte permet de déterminer le seuil d'écoulement d'un matériau. En effet, pour des valeurs de contrainte inférieures au seuil d'écoulement, le matériau se comporte comme un solide élastique. Lorsque la contrainte appliquée passe au-delà du seuil d'écoulement, le matériau s'écoule.

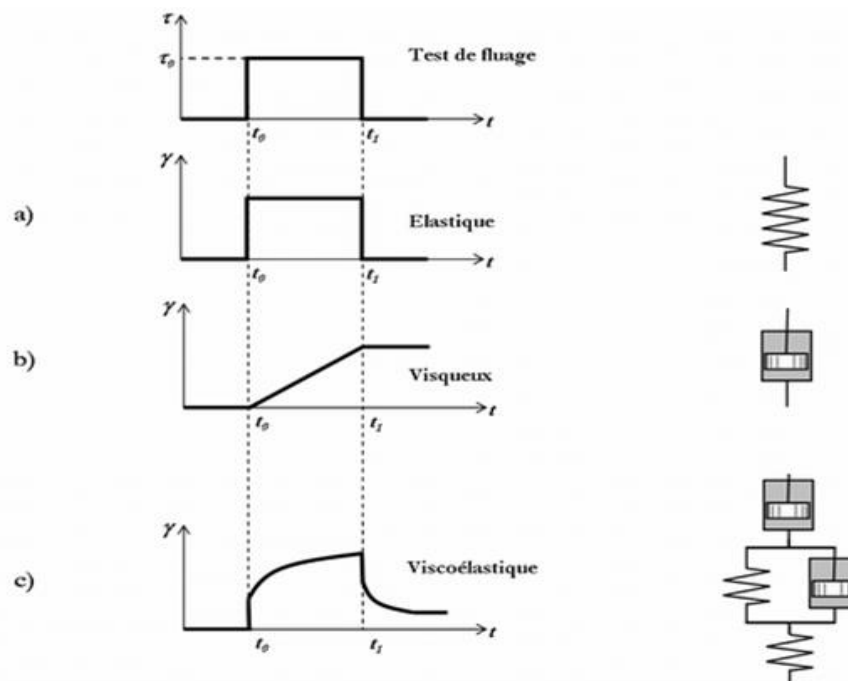


Figure II.12. Essai de fluage suivi de recouvrance a) solide élastique, b) fluide visqueux, c) matériau viscoélastique (Benchabane 2006)

a.2) Essai dynamique

Le test dynamique ou oscillatoire consiste à appliquer une petite déformation (ou contrainte) sinusoïdale de fréquence connue et à mesurer la contrainte (ou déformation) résultante. Au cours de ce mouvement périodique, la contrainte τ et la déformation γ évoluent sinusoïdalement au cours du temps avec la même pulsation ω , en présentant un certain

déphasage δ l'un par rapport à l'autre. L'expression de la contrainte de cisaillement est de la forme :

$$\tau = \tau_0 \cos(\omega t) \quad (II.21)$$

τ_0 est l'amplitude de la contrainte appliquée et ω la fréquence d'oscillation. Les expériences étant effectuées dans le domaine d'élasticité linéaire, la linéarité des équations entraîne une réponse (déformation) périodique de même fréquence avec un déphasage exprimé dans la relation ci-dessous :

$$\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t + \delta) \quad (II.22)$$

Selon la valeur du déphasage obtenu, on distingue :

- Les systèmes parfaitement élastiques pour lesquels le déphasage est nul.
- Les fluides purement visqueux de déphasage égal à $\pi/2$.
- Les systèmes intermédiaires (viscoélastiques) pour lesquels $0 < \delta < \pi/2$.

Lors de la sollicitation, une partie de l'énergie est conservée sous forme d'énergie récupérable et une autre est dissipée. Il s'agit respectivement de l'élément élastique de module G' et de l'élément visqueux de module G'' . Ce qui laisse définir un module de rigidité complexe :

$$G^* = G' + iG'' \quad (II.23)$$

b) Modélisation de la viscoélasticité

Le modèle de Kelvin-Voigt et le modèle de Maxwell sont les deux principaux modèles qui permettent d'illustrer la viscoélasticité.

b.1) Modèle de Kelvin-Voigt

Le modèle de Kelvin-Voigt (ou solide de Voigt) est constitué par l'association en parallèle d'un amortisseur de viscosité η et d'un ressort de complaisance J (Figure II.13). Le modèle est désigné pour l'étude du comportement au fluage des solides viscoélastiques (Darwiche 2012).

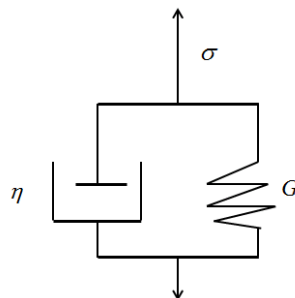


Figure II.13. Modèle de Kelvin-Voigt pour un solide viscoélastique (association en parallèle d'un ressort et amortisseur)

On peut écrire la contrainte de l'ensemble des systèmes comme la somme des contraintes de chaque branche :

$$\tau = \tau_{\text{élastique}} + \tau_{\text{visqueux}} \quad (II.24)$$

$\tau_{\text{élastique}} = \frac{\gamma_r}{J}$ dans la branche de ressort, $G = \frac{1}{J}$ décrit l'élasticité du matériau, γ_r est la déformation d'un solide élastique.

$\tau_{\text{visqueux}} = \eta \dot{\gamma}_a$ dans la branche de l'amortisseur.

La déformation totale est égale à la déformation de chaque branche :

$$\gamma = \gamma_{\text{élastique}} = \gamma_{\text{visqueux}} \quad (II.25)$$

L'équation différentielle rhéologique du solide Kelvin-Voigt est alors déduite d'après les équations (II.24) et (II.25) (Darwiche 2012):

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (II.26)$$

Où :

$$\eta \frac{d\gamma}{dt} + G\gamma - \tau = 0 \quad (II.27)$$

Il s'agit de la forme standard de l'équation constitutive du modèle de Kelvin-Voigt montrant la relation entre contrainte et déformation.

Fluage et recouvrance:

$\tau = \tau_0$ (Constant), donc l'équation (II.27) donne :

$$\eta \frac{d\gamma}{dt} + G\gamma - \tau_0 = 0 \quad (II.28)$$

Il s'agit d'une équation différentielle ordinaire non homogène linéaire avec des coefficients constants. Sa solution est donnée par l'équation suivante (Sultan 2012).

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} + Ae^{-\left(\frac{t}{Tr}\right)} \quad (II.29)$$

Les conditions initiales associées au fluage sont données par les équations :

$$\tau(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \tau_0, & t \geq 0 \end{cases}$$

$$\gamma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{\tau_0}{G}, & t = 0 \end{cases}$$

En appliquant ces conditions initiales à l'équation (II.29), on obtient :

$$A = -\frac{\tau_0}{G} \quad (II.30)$$

Par conséquent, l'équation (II.29) prend la forme :

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{Tr}\right)}\right) \quad (II.31)$$

Cela signifie que la déformation augmente jusqu'à une valeur constante à mesure que le temps augmente.

La description complète de l'application de la contrainte constante τ_0 et la réponse de fluage-recouvrance qui en résulte pour le modèle de Kelvin-Voigt est montrée dans les figures (II.14) et (II.15) (Sultan 2012).

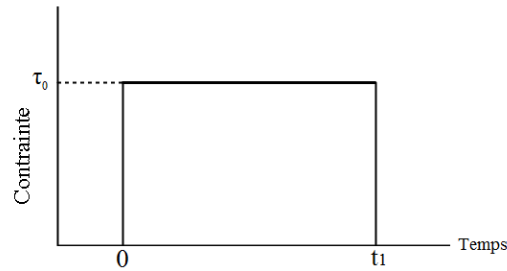


Figure II.14. Application d'une contrainte constante à l'étude du fluage - recouvrance dans le modèle de Kelvin-Voigt

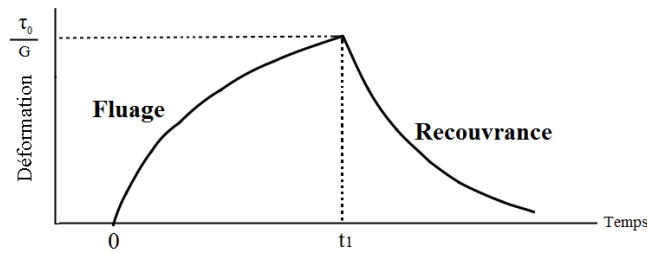


Figure II.15. Réponse de fluage- recouvrance du modèle de Kelvin-Voigt

Relaxation

On envisage le prochain test de relaxation de contrainte. En fixant la déformation pour être constante (Figure II.16), l'équation (II.27) se réduit à (Sultan 2012):

$$G\gamma_0 - \tau = 0 \quad (II.32)$$

$$\Rightarrow \tau = G\gamma_0 \quad (II.33)$$

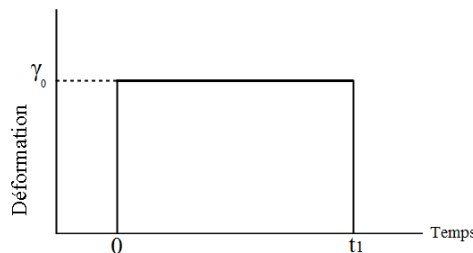


Figure II.16. Application d'une déformation constante pour étudier la réponse de relaxation dans le modèle de Kelvin-Voigt

Cela signifie que la déformation est absorbée par le ressort et reste constant au fil du temps pour la même souche. Par conséquent, il n'y a en fait aucune relaxation de contrainte au fil du temps (Figure 17).

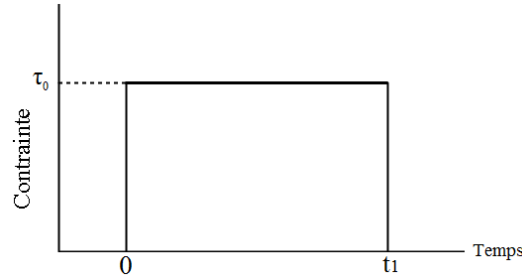


Figure II.17. Réponse de relaxation de contrainte du modèle de Kelvin-Voigt

Essai dynamique

Pour une contrainte sinusoïdale $\tau = \tau_0 e^{i\omega t}$, la déformation sinusoïdale est donnée par :

$$\gamma = \gamma_0 e^{i\omega(t+\delta)}$$

En remplaçant ces expressions dans l'équation (II.27), on obtient l'expression suivante:

$$\tau = \eta i \omega \gamma_0 e^{i\omega(t+\delta)} + G \gamma \quad (II.34)$$

$$\leftrightarrow \tau = \eta i \omega \gamma + G \gamma \quad (II.35)$$

$$\leftrightarrow \tau = (G + \eta i \omega) \gamma \quad (II.36)$$

$$\leftrightarrow \tau = G^* \gamma \quad (II.37)$$

Avec : $G^* = (G + i\eta\omega) \quad (II.38)$

Les parties réelle et imaginaire de l'équation (II.38) peuvent être données par :

$$G'(\omega) = G \quad (II.39)$$

$$G''(\omega) = \eta\omega \quad (II.40)$$

b.2) Modèle de Maxwell

Le modèle de Maxwell se compose d'un ressort associé en série avec un amortisseur comme l'indique la figure (II.18).

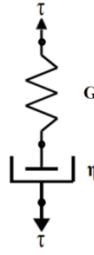


Figure II.18. Présentation du modèle de Maxwell (l'association en série d'un ressort et d'amortisseur)

Le modèle de Maxwell représente un fluide viscoélastique. Il est schématisé par un ressort idéal de raideur G_0 et un amortisseur idéal de constante η monte en série pour simuler le comportement élastique et la viscosité. L'amortisseur obéit à la loi de Newton et le ressort à celle d'Hooke (Sultan 2012).

Dans le cas du modèle de Maxwell, les déformations élastiques et visqueuses s'additionnent et les contraintes sont identiques :

$$\gamma = \gamma_r + \gamma_a \quad (II.41)$$

$$\tau = \tau_r = \tau_a \quad (II.42)$$

τ_r, τ_a représentent respectivement la contrainte dans le ressort et l'amortisseur.

A partir $\gamma_r = \frac{\tau}{G_0}$ et $\gamma_a = \frac{\tau}{\eta}$ on obtient :

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} + \frac{\tau}{\eta} \quad (II.43)$$

Ce qui s'écrit aussi :

$$\tau + \frac{\eta}{G_0} \tau = \eta \gamma \quad (II.44)$$

Ou :

$$\tau + T_r \tau = \eta \gamma \quad (II.45)$$

Avec $T_r = \frac{\eta}{G_0}$, s'appelle le temps de relaxation.

Fluage et recouvrance

Dans un essai de fluage, un matériau est soumis à une contrainte constante et à une température donnée. La déformation du matériau en fonction du temps est étudiée.

Pour le test de fluage, $\tau = \tau_0 = \text{Constant}$, ce qui donne $d\tau = 0$, l'équation (II.43) devient :

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\tau}{\eta} \quad (II.46)$$

En intégrant l'équation (II.46), on obtient :

$$\gamma = \frac{\tau}{\eta} t + C \quad (II.47)$$

Où C est la constante de l'intégration. Sa valeur est déterminée en utilisant les conditions initiales de contrainte et de déformation données dans les équations suivantes:

$$\tau(t) = \begin{cases} 0, t < 0 \\ \tau_0, t \geq 0 \end{cases}$$

$$\gamma(t) = \begin{cases} 0, t < 0 \\ \frac{\tau_0}{G}, t = 0 \end{cases}$$

L'application de ces conditions initiales à l'équation (II.47) donne $C = \frac{\tau_0}{G}$, donc, l'équation (II.47) implique:

$$\gamma(t) = \tau_0 + \left(\frac{1}{\eta} t + \frac{1}{G} \right) \quad (II.48)$$

La description complète de l'application de la contrainte constante τ_0 et la réponse au fluage-recouvrance qui en résulte pour le modèle de Maxwell est représentée respectivement sur les figures (II.19) et (II.20).

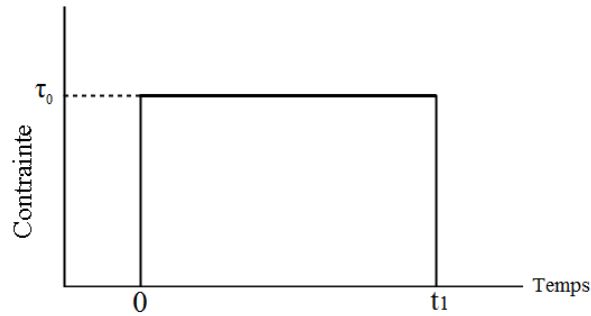


Figure II.19. Application d'une contrainte constante à l'étude du fluage - recouvrance dans le modèle de Maxwell

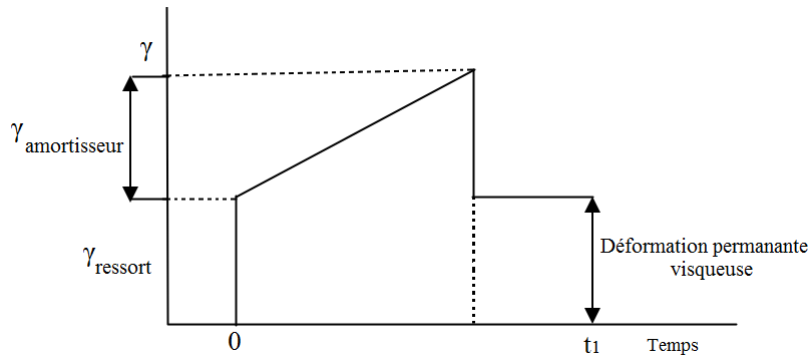


Figure II.20. Réponse de relaxation de contrainte du modèle de Maxwell

Relaxation

À une température donnée, dans un test de relaxation des contraintes, un matériau est soumis à une déformation constante. Le comportement des contraintes en fonction du temps est étudié.

Pour le test de relaxation de contrainte, $\gamma = \gamma_0 = \text{constant}$, ce qui donne $d\gamma = 0$, l'équation (II.44) devient donc :

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} G = 0 \quad (II.49)$$

En séparant les variables et en les intégrant, on obtient :

$$\int_{\tau_0}^{\tau} d\tau/\tau = -\frac{G}{\eta} \int_0^t dt \quad (II.50)$$

$$\implies \ln\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) = -\frac{G}{\eta} t + C \quad (II.51)$$

Où C est constant d'intégration. Sa valeur est déterminée en utilisant les conditions initiales données ci-dessous.

$$\gamma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \gamma_0, & t \geq 0 \end{cases}$$

$$\tau(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \tau_0, & t = 0 \end{cases}$$

On obtient $C = 0$

$$\implies \ln\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) = -\frac{G}{\eta} t \quad (II.52)$$

$$\implies \tau(t) = \tau_0 e^{-\left(\frac{G}{\eta}\right)t} \quad (II.53)$$

$$\implies \tau(t) = \tau_0 e^{-\left(\frac{t}{T_r}\right)} \quad (II.54)$$

Avec : $T_r = \frac{\eta}{G}$ est le terme constant pour le modèle de Maxwell. Il est appelé le temps de relaxation. Cela montre que la contrainte diminue exponentiellement de sa valeur initiale à zéro avec la constante de temps T_r .

La description complète de l'application de la déformation constante γ_0 et la réponse résultante de relaxation des contraintes pour le modèle de Maxwell est montrée dans les figures (II.21) et (II.22).

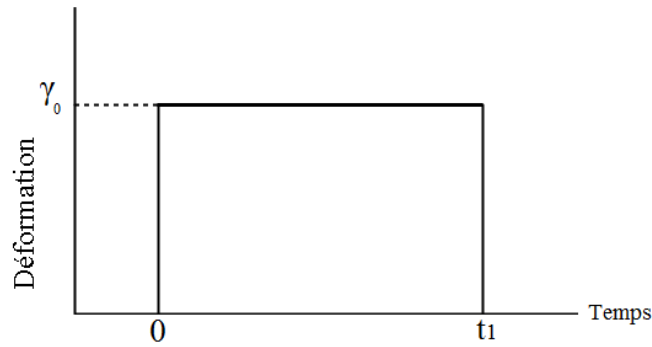


Figure II.21. Application d'une déformation constante pour étudier la réponse de relaxation dans le modèle de Maxwell

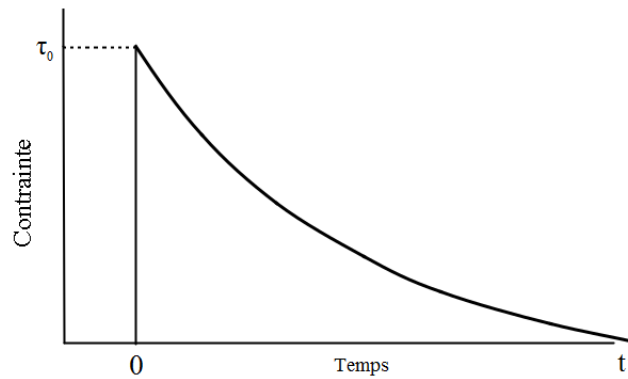


Figure II.22. Réponse de relaxation de contrainte du modèle de Maxwell

La figure (II.22) montre que la contrainte diminue avec l'augmentation du temps. L'équation (II.54) peut également s'écrire :

$$\frac{\tau(t)}{\gamma} = G e^{-\left(\frac{t}{Tr}\right)} \quad (II.55)$$

Où G est la constante du ressort. Le terme $G e^{-\left(\frac{t}{Tr}\right)}$ est désigné par $G(t)$ et appelé le module de relaxation. Par conséquent, l'équation (II.55) prend la forme :

$$G(t) = G e^{-\left(\frac{t}{Tr}\right)} \quad (II.56)$$

Pour les vrais liquides viscoélastiques, la courbe de relaxation des contraintes est généralement décrite par une série de modèles Maxwell en parallèle :

$$G(t) = \sum G_i e^{-\left(\frac{t}{Tr_i}\right)} \quad (II.57)$$

Où les différents paramètres sont généralement obtenus par ajustement de courbe non linéaire. L'équation (II.57) est très utile pour déterminer le spectre de relaxation du fluide. Ce dernier permet de montrer comment le matériau s'adoucît avec le temps.

Essai dynamique

Supposons que l'échantillon soit soumis à une déformation sinusoïdale d'amplitude γ_0 et de pulsation ω , la déformation s'écrit par (Darwiche 2012):

$$\gamma = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (II.58)$$

La réponse en contrainte s'écrit, dans le domaine linéaire.

$$\tau = \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (II.59)$$

On considère le rapport entre la contrainte et la déformation que l'on note G^* :

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{i\delta} = G' + G'' \quad (II.60)$$

Ce rapport est appelé rapport de rigidité ou module de cisaillement complexe ayant un module et une phase δ qui est le déphasage entre la contrainte et la déformation.

En pratique, on préfère utiliser les deux grandeurs de rhéologie dynamique qui sont la partie réelle G' et imaginaire G'' du module de cisaillement.

$$G^* = G' + G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{i\delta} \quad (II.61)$$

En séparant la partie réelle et imaginaire du module de cisaillement :

$$G' = G_0 \cos \delta \quad (II.62)$$

$$G'' = G_0 \sin \delta \quad (II.63)$$

G' et G'' décrivent respectivement les propriétés élastiques et visqueuses du fluide et ces modules sont appelés module élastique pour G' et module visqueux pour G'' . Le déphasage δ est relié à ces deux modules par la relation :

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (II.64)$$

Le déphasage δ joue le rôle d'un indicateur très précieux du partage entre les propriétés élastiques et visqueuses d'un fluide. δ et $\tan \delta$ sont appelés respectivement l'angle de perte et la tangente de perte.

En remplaçant les équations (II.58) et (II.59) dans l'équation (II.44) du modèle de Maxwell, on obtient l'expression suivante:

$$\tau_0 e^{i\delta} (1 + \tau \omega i) = \eta \omega \gamma_0 i \quad (II.65)$$

La séparation des parties réelles et imaginaires de l'équation (II.65) permet d'obtenir le cosinus et le sinus de l'angle δ en fonction de la pulsation et du temps de relaxation :

$$\cos \delta = \frac{\tau^2 \omega^2}{1 + \tau^2 \omega^2} \quad (II.66)$$

$$\sin \delta = \frac{\tau \omega}{1 + \tau^2 \omega^2} \quad (II.67)$$

En remplaçant les équations (II.66) et (II.67) dans les équations (II.62) et (II.63). Il est alors possible d'obtenir les expressions de la partie réelle G' et de la partie imaginaire G'' du module de cisaillement :

$$G' = \frac{G_0 \tau^2 \omega^2}{1 + \tau^2 \omega^2} \quad (II.68)$$

$$G'' = \frac{G_0 \tau \omega}{1 + \tau^2 \omega^2} \quad (II.69)$$

La figure (II.23) représente l'évolution de la partie réelle G' et de la partie imaginaire G'' du module complexe de cisaillement en fonction des fréquences dans le cas du modèle de Maxwell. À basse fréquence, le fluide se comporte comme un fluide visqueux, le module de perte est largement plus élevé que celui de conservation G' . Le module de perte augmente linéairement avec la fréquence, tandis que le module de conservation varie comme le carré de la fréquence. Lorsque la fréquence augmente, le module de conservation tend vers un plateau, et le module de perte diminue, le fluide se comporte donc comme un solide élastique. Lorsque G' et G'' se croisent, il s'agit d'une zone de transition de l'écoulement et la pulsation correspondante est $\omega = \frac{1}{\tau}$.

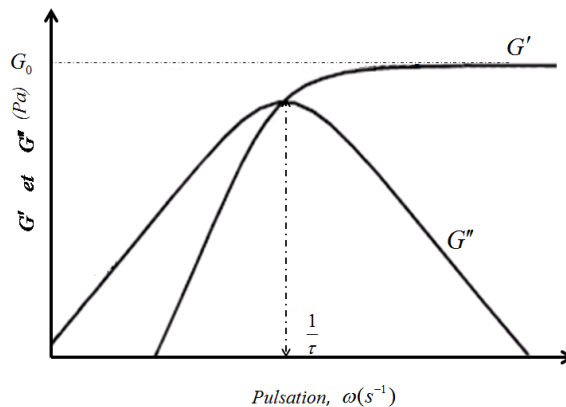


Figure II.23. G' et G'' en fonction de ω (Comportement de fluide de Maxwell)

La viscosité complexe η^* est définie par :

$$\eta^* = \frac{1}{i\omega} G^* \quad (II.70)$$

$$\eta^* = \frac{G''}{\omega} - i \frac{G'}{\omega} = \eta' - i\eta'' \quad (II.71)$$

$$\begin{aligned} \eta' &= \frac{G''}{\omega} \\ \eta'' &= \frac{G'}{\omega} \end{aligned}$$

II.3 Rhéométrie

II.3.1 Définition du rhéomètre

Le rhéomètre est un appareil de mesure des propriétés rhéologiques des fluides. Il permet de caractériser la viscosité, la plasticité et l'élasticité. On distingue trois classes de rhéomètres (Wissbrun 1998 ; Guy et al. 2014 ; Mukandila et al. 2015):

- **Les rhéomètres à régime permanent** : il s'agit essentiellement de viscosimètres. Pour ce type de viscosimètre, l'échantillon étudié est soumis à un mouvement laminaire de cisaillement indépendant du temps. Il existe deux types de viscosimètres à régime permanent : le viscosimètre de poiseuille et le viscosimètre à chute de bille.
- **Les rhéomètres à régime transitoire** : ce type de rhéomètre permet d'étudier les propriétés viscoélastiques des matériaux. L'échantillon est soumis à une sollicitation instantanée. Par la suite, sa relaxation après la perturbation est étudiée
- **Les rhéomètres dynamiques** : ces rhéomètres fonctionnent en régime sinusoïdale et fournissent une description des propriétés rhéologiques des matériaux. L'échantillon est soumis à un mouvement de cisaillement sinusoïdal en fonction de la fréquence, ce qui permet notamment de mesurer les propriétés viscoélastiques de l'échantillon.

II.3.2 Typologie de géométries des rhéomètres

Le rhéomètre est constitué d'un axe de rotation lié à un moteur à vitesse imposée ou à un couple imposé et d'une cellule de mesure (Darwiche 2012). La cellule est composée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Le fluide est confiné entre le rotor et le stator dans une zone appelée entrefer. Les rhéomètres rotatifs sont classés en deux familles, rhéomètres à contrainte imposée et rhéomètres à déformation imposée. Ils peuvent être équipés de plusieurs géométries de mesure d'écoulement: cylindres coaxiaux, cône-plan et plan-plan (El Kissi et Pignon 2006).

II.3.2.1 Cylindres coaxiaux

Ce type de rhéomètre est constitué de deux cylindres coaxiaux (Figure II.24). Le cylindre intérieur de rayon R_1 , le cylindre extérieur de rayon R_2 , et de hauteur h . Le fluide se trouve en écoulement de cisaillement entre les deux cylindres coaxiaux par la rotation du cylindre intérieur. Le moment du couple appliqué est mesuré en imposant une vitesse de rotation angulaire (El Kissi et al. 2006 ; Darwiche 2012).

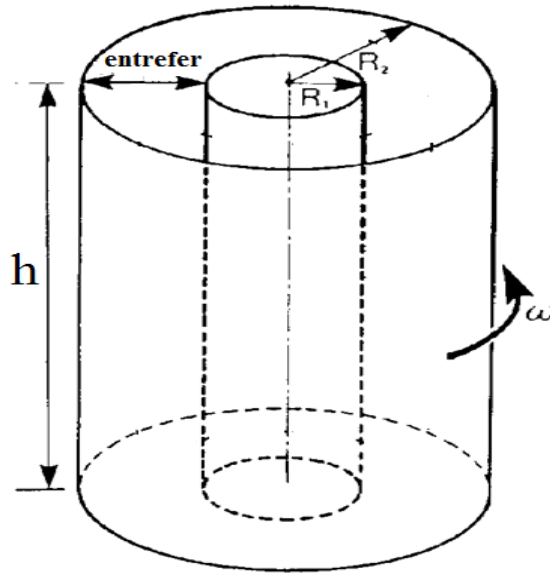


Figure II.24. Rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux

Le couple exercé sur le cylindre intérieur pour le faire tourner à la vitesse de rotation ω est :

$$C = \tau \times \text{Surface} \times \text{Rayon} \quad (\text{II.59})$$

La contrainte de cisaillement peut être calculée comme suit :

$$\tau = \frac{C}{2\pi R_1^2 h} \quad (\text{II.60})$$

Le taux de cisaillement est donné :

$$\gamma = \frac{\omega}{e} R \quad (\text{II.61})$$

Avec :

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (\text{II.62})$$

$$e = R_2 - R_1 \quad (\text{II.63})$$

Où : R_1 et R_2 sont respectivement les rayons du cylindre intérieur et extérieur et ω la vitesse angulaire.

La viscosité est donnée :

$$\eta = \frac{C(R_2 - R_1)}{2\pi h R_1^2 R} \quad (\text{II.64})$$

Pour un fluide newtonien, le gradient de vitesse est relié à la vitesse angulaire ω , est donné :

$$\gamma = \frac{2\omega}{[1 - (\frac{R_1}{R_2})^2]} \quad (II.65)$$

Pour un fluide non newtonien, le gradient de vitesse prend en compte l'indice de pseudo-plasticité n du matériau :

$$\gamma = \frac{2\omega}{n[1 - (\frac{R_1}{R_2})^{\frac{2}{n}}]} \quad (II.66)$$

II.3.2.2 Géométrie cône-plan

Cette géométrie est constituée d'un cône et un plan. Le fluide est cisailé entre le cône et le plan (Figure II.25). Le cône est caractérisé par le rayon R et angle α . Il est fixé sur la partie tournante du rhéomètre et lui confère une rotation par rapport à son axe avec une vitesse angulaire constante ω . Pour cette géométrie, le gradient de cisaillement est directement proportionnel à la vitesse de rotation du système. Le cisaillement est donc uniforme et constant dans tout l'entrefer entre le cône et le plan (El Kissi et al. 2006 ; Azouz 2010).

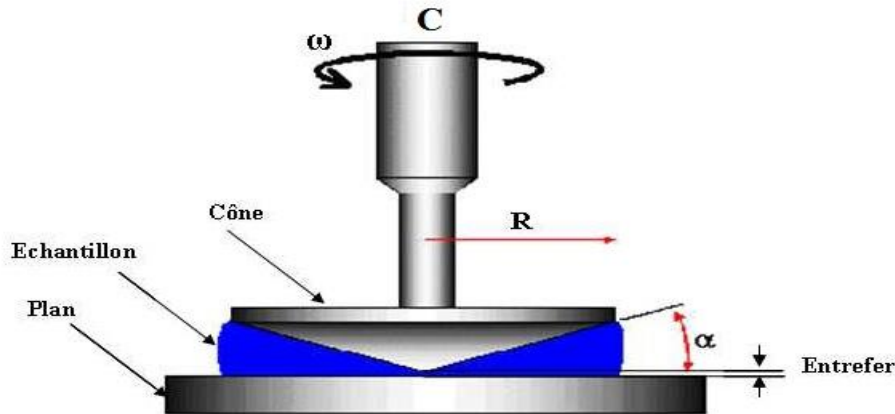


Figure II.25. Géométrie cône-plan

Après avoir mesuré le couple (C), la contrainte de cisaillement et la déformation de cisaillement peuvent être calculées comme suit.

$$\gamma = \frac{1}{\alpha} \omega \quad (II.67)$$

$$\tau = \frac{3}{2\pi R^3} C \quad (II.68)$$

La viscosité est donnée par :

$$\eta = \frac{3C\alpha}{2\pi\omega R^3} \quad (II.69)$$

II.3.2.3 Géométrie plan-plan

Le rhéomètre plan-plan se compose de deux disques circulaires de même rayon R coaxiaux séparés par un entrefer d'épaisseur " e " (Figure II.26). Le fluide est donc confiné dans l'espace entre les deux disques. L'écoulement est généré par la rotation du disque supérieur. Le disque inférieur reste fixe.

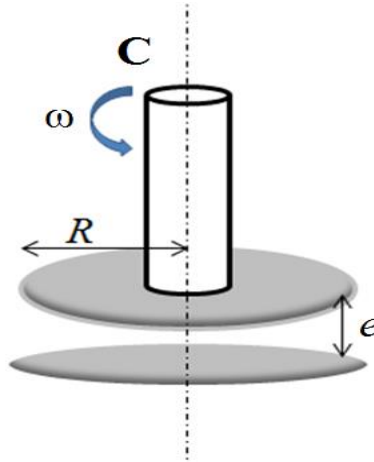


Figure II.26. Géométrie plan-plan

Considérons que le disque inférieur est fixe et le disque supérieur tourne avec une vitesse angulaire ω . Après avoir mesuré le couple C sur le disque, la contrainte et la vitesse de cisaillement peuvent être calculées comme suit.

$$\gamma = \frac{\omega}{e} R \quad (II.70)$$

$$\tau = \frac{2C}{\pi R^3} \quad (II.71)$$

La viscosité est donnée par :

$$\eta = \frac{2eC}{\omega \pi R^4} \quad (II.72)$$

II.3.3 Avantages et inconvénients des différentes géométries de mesures

Les différentes géométries de mesures rhéologiques de type couette, cône-plan et plan-plan sont caractérisées par des avantages et des inconvénients. Le Tableau II.1 regroupe les avantages et les inconvénients de chaque géométrie.

Tableau II.1. Avantages et inconvénients des différentes géométries de mesures (El Kissi et al. 2006)

Type de rhéomètre	Avantages	Inconvénients
Rhéomètre de couette	• Effets de bords limités grâce à l'étendue des surfaces en regard. • Peu de risques d'éjection du produit même à fort gradient de cisaillement. • Particulièrement adaptée à l'étude des fluides peu visqueux.	• Gradient de cisaillement non homogène dans les larges entrefers. • Efforts normaux difficiles à mesurer en pratique du fait de la courbure des lignes de courant. • Visualisation du champ de déformation difficile. • Remplissage de la cellule de mesure délicat, en particulier pour les fluides consistants.
Rhéomètre cône-plan	• Le gradient de cisaillement est uniforme et constant dans l'entrefers entre le cône et le plan. • Il permet une mesure directe et simple de la première différence de contraintes normales. • Démontage et contrôle visuel simples de la géométrie.	• Les recirculations se développent en particulier pour les cônes ayant un angle important. • Présence d'une surface libre. • Difficulté de mise en place pour les systèmes très consistants du fait du développement des contraintes normales.
Rhéomètre plan-plan	• La valeur de l'entrefers peut être adaptée au type d'échantillon manipulé. • Il permet une mesure indirecte de la seconde différence de contraintes normales. • Démontage et contrôle visuel simples de la géométrie.	• Le gradient de cisaillement n'est pas le même dans tout l'entrefers. • Présence d'une surface libre.

II.3.4 Problèmes expérimentaux

Pendant les tests rhéologiques, certains problèmes expérimentaux pouvant intervenir. Benchabane (2006) a indiqué que la fiabilité des résultats expérimentaux est liée directement à la maîtrise de l'effet de tous les paramètres influençant la mesure. Les trois phénomènes les

plus couramment rencontrés sont le problème d'évaporation de l'échantillon, les glissements au niveau des parois de la géométrie de mesure et le problème d'inertie de l'outil rotatif lors des accélérations ou décélérations rapides. Ces trois phénomènes sont explicités ci-dessous afin d'en tenir compte et limiter leurs effets sur les essais.

II.3.4.1 Glissement aux parois

C'est le phénomène le plus couramment rencontré. Le contact du fluide avec la géométrie de mesure peut provoquer un glissement aux parois plus ou moins important, dû à la douceur de ses surfaces. Ainsi, une fine couche du fluide est produite près des parois. Ce phénomène est lié à la vitesse de rotation du rotor et à la viscosité du fluide. Barnes (1995) a rapporté que le glissement aux parois entraîne des erreurs de mesures, en particulier pour l'étude des fluides à contrainte seuil avec un rhéomètre à contrainte imposée. Dans le cas des suspensions, la migration des particules et la décroissance de la concentration solide près de la paroi lisse sont généralement l'origine du phénomène de glissement. Ce phénomène est discuté par plusieurs chercheurs (Quemada 1977, 1978). Il est appelé 'effet sigma'. Pour traiter le problème de glissement, l'application d'une surface rugueuse avec un papier verre peut réduire ce phénomène (Azouz 2010 ; Rouis 2017).

II.3.4.2 Problème d'évaporation

Le phénomène d'évaporation se produit principalement dans le cas de suspensions à base d'eau ayant une surface libre. Au contact de l'atmosphère, une partie de la suspension est soumise à une évaporation sous l'influence de la température et de la pression.

Le problème conduit à une diminution du volume étudié. Ceci pourrait conduire à une diminution de la viscosité apparente mesurée. D'un autre côté, la concentration massique augmente ce qui induit une augmentation de la viscosité apparente. Pour réduire le problème d'évaporation, des techniques consistent à travailler dans un milieu saturé en vapeur d'eau ou placé un couvercle anti-évaporation autour de la géométrie.

II.3.4.3 Inertie de l'outil rotatif

L'utilisation de rhéomètre à contrainte imposée peut conduire à des erreurs de mesure. Ces erreurs sont dues à un retard dans la réponse de l'outil aux sollicitations lors de la montée ou de la descente en contrainte. Pour remédier à ce phénomène, il y a une méthode de calcul pour étudier et éliminer ce type d'erreur.

II.4 Rhéologie du lœss et applications

Les techniques rhéologiques comportent un certain nombre de mesures quantitatives basées sur la physique qui offrent une meilleure compréhension du comportement de la microstructure du sol lorsqu'elle est soumise aux contraintes (Zhu et al. 2017). L'étude rhéologique du comportement micromécanique et des changements microstructuraux des sols est liée principalement à la connaissance de la mécanique des sols. L'application de la rhéologie aux études mécaniques du sol est relativement faible (Baumgarten et Peth 2006; Markgraf 2006). Pour un système intergranulaire sensible, des paramètres tels que les propriétés physico-chimiques, les caractéristiques des grains ainsi que les propriétés hydrauliques (teneur en eau) sont d'une grande importance pour étudier et définir le comportement au cisaillement et la déformation des sols à l'échelle microscopique (Markgraf 2006).

Pour l'étude de la microstructure des sols lœssiques, la rhéologie présente donc une propriété mécanique importante. Elle donne notamment accès à plusieurs informations utiles relatives à l'application du lœss dans l'ingénierie. Ainsi, la recherche du modèle rhéologique approprié rend performant l'adaptation large aux applications d'ingénierie (Li 2015).

Dans la pratique, des méthodes rhéologiques sont appliquées pour étudier les propriétés mécaniques et la microstructure du lœss. Ces études ont introduit la rhéologie pour évaluer notamment le risque de la liquéfaction et l'effondrement du lœss.

Guo et al. (2003) a décrit l'aspect rhéologique de la propriété d'effondrement du lœss produit par l'eau d'irrigation dans le nord-ouest de la Chine. Un modèle rhéologique de Voigt généralisé est proposé pour expliquer la relation entre la contrainte et la déformation en fonction du temps. Les résultats montrent une contrainte de compression retardée, pourrait expliquer le tassement par effondrement du lœss.

Karam (2006) a appliqué la rhéométrie pour évaluer le risque de la liquéfaction du lœss au nord de la France. Il déclare que l'effondrement est dû à l'infiltration d'eau et lié à la circulation des trains quand le sol est soumis à la vibration à l'état saturé. Des essais de triaxial cyclique ont été réalisés. L'effet de l'endommagement a été étudié par l'application d'une charge cyclique à l'aide de la presse. Karam (2006) a utilisé le modèle de plasticité et le modèle élastoplastique pour décrire le phénomène de liquéfaction et d'endommagement. L'évaluation est donnée sous forme d'un facteur de sécurité qui varie avec la profondeur. Les simulations numériques ont montré que l'endommagement est d'autant plus important que le pourcentage de cimentation est faible. Les résultats montrent ainsi que la limite élastique

augmente avec la cimentation du sol. Les courbes de résistance à la liquéfaction ont montré que la résistance du sol diminue et la déformation est plus importante avec l'augmentation de la teneur en eau.

Szegi et al. (2006) ont indiqué qu'en général, l'application de la rhéologie fournit de nouvelles informations quantitatives sur l'interaction particule-particule, la stabilité colloïdale et la structure des suspensions concentrées. Dans ce travail, Szegi et al. (2006) ont étudié la stabilité et la déformation des micros-agrégats du loess. Les auteurs ont conclu que la rhéologie s'est avérée être un outil très utile pour détecter et quantifier les changements dus à la dégradation de la stabilité. Ils ont signalé qu'une forte relation a été établie entre la force interparticulaire et les paramètres naturels du sol, dans laquelle la matière organique, la teneur en carbonate de calcium et la teneur en argile du sol jouent un rôle dominant. Les courbes d'écoulement sont modélisées par le modèle de Bingham. Les résultats indiquent que la valeur du seuil d'écoulement a une relation directe avec l'énergie attractive entre les particules. En général, plus la valeur du seuil d'écoulement est élevée plus le réseau interparticulaire du sol est fort, ce qui augmente la résistance à la déformation.

Khaidapova et al. (2015) ont indiqué que les propriétés rhéologiques des sols sont corrélées à la teneur en éléments solides, la composition minérale argileuse, la matière organique, etc. Par conséquent, une dominance de tel ou tel minéral dans le sol entraîne un comportement physique et rhéologique différent. Khaidapova et al. (2015) ont évalué les propriétés rhéologiques de différents minéraux et sols argileux. Des essais en balayage d'amplitude sont effectués afin de caractériser l'élasticité et la viscosité. Ils ont constaté que l'augmentation de la teneur en fraction de limon (10-50 μm) et la diminution de la teneur en fractions fines (<2 μm) dans le loess limoneux réduit les propriétés élastiques du sol.

Duan et Peng (2016) ont réalisé des tests triaxiaux pour décrire les propriétés rhéologiques et fluage du loess dans la région de Guanzhong en Chine. L'analyse de la courbe contrainte-déformation a révélé que, dans différentes conditions, la courbe avait un point d'inflexion significatif, correspondant à la contrainte seuil de l'échantillon. Ils ont constaté que lorsque la contrainte appliquée est inférieure à celle de la contrainte seuil, un comportement viscoélastique s'est produit, et lorsque la contrainte est supérieure à celle de la contrainte seuil, le loess présente un modèle viscoplastique non linéaire.

Auparavant, Keil et Triegler (1961) ont étudié l'effet des produits chimiques hydratants sur les propriétés rhéologiques du loess. Ils ont utilisé le silicate de potassium, carbonate de potassium, et le carbonate de sodium. Des essais triaxiaux sont effectués. L'effet d'hydratation

des produits chimiques étant exprimé par une valeur de résistance à la compression maximale. Les auteurs ont conclu que l'addition des produits chimiques d'hydratation et des argiles permet de réduire considérablement la limite de liquidité, et d'augmenter la résistance au cisaillement, la résistance à l'érosion et la densité.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue la littérature relative à la rhéologie et à la rhéométrie. Dans le domaine des études rhéologiques, on distingue trois catégories de fluides : les fluides newtoniens, les fluides non newtoniens indépendants ou dépendants du temps et les fluides viscoélastiques. La mesure des propriétés rhéologiques peut effectuer au moyen de rhéomètres. Ces rhéomètres sont équipés de plusieurs géométries de mesure d'écoulement. Dans le présent chapitre, nous avons abordé également à l'application de la rhéologie pour l'étude de la microstructure du lœss. Cette discipline donne notamment accès à plusieurs informations utiles relatifs à l'application du lœss dans l'ingénierie des sols.

Chapitre III

Traitement du loess par l'ajout
de la chaux et de la bentonite

III.1 Introduction

Le loess est un sol effondrable. Ce type de sol peut causer de nombreux dommages et catastrophes géotechniques. Pour faire face à ces problèmes, des techniques d'amélioration de la résistance des sols sont proposées. Parmi ces méthodes, il ya le traitement par processus physico-chimique à travers l'addition des liants et agents cimentaires (Pei et al. 2015; Tabarsa 2018, Seiphoori et Zamanian 2020). Cette technique permet la création de nouvelles liaisons structurales, à la suite desquelles la cohésion inter-particule du loess augmente. Le présent chapitre aborde les méthodes du traitement par l'ajout de la bentonite et la chaux. Ce traitement est favorisé dans la construction d'infrastructures pour améliorer l'ouvrabilité du sol et les propriétés d'ingénierie.

III.2 Traitement du loess par l'ajout de la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les sols a connu beaucoup de succès. Elle présente un moyen efficace d'améliorer et stabiliser les propriétés des sols. Cette technique s'appelle la stabilisation à la chaux et consiste à ajouter de la chaux au sol. L'additif permet de modifier les propriétés mécaniques des sols de façon permanente (Vilhena et al. 2020).

La chaux est obtenue par calcination du calcaire. Selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux. La chaux aérienne provenant d'un calcaire pur, la chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium et la chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux (Vaschalde et al. 2016).

Dans le domaine du génie civil, la chaux utilisée essentiellement en technique de construction et routières est la chaux aérienne. Elle se présente sous deux formes: chaux vive (CaO) et chaux hydratée Ca(OH)_2 .

La technique de la stabilisation par l'ajout de la chaux consiste à améliorer la résistance mécanique des sols et diminuer la sensibilité à l'eau. Elle a pour but de :

- Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité).
- Colmater les vides.
- Créer des liens et renforcer les liaisons inter-particulaires (résistance mécanique).

Les propriétés stabilisantes à la chaux sont causées par un renforcement dû à la capacité d'échange cationique par opposition à un effet de cimentation dû à une réaction pouzzolanique (Amhadi et Assaf 2018). La stabilisation à la chaux la plus efficace peut être effectuée lorsque le sol contient beaucoup de particules d'argile, qui flocculent et transforment

les particules d'argile naturelles en forme de plaque d'aiguilles avec des structures métalliques qui s'imbriquent (Makusa 2013). Avec le traitement à la chaux, les sols argileux deviennent plus secs et moins affectés par les changements dus aux fluctuations des particules du sol (El-Badawy et Valentin 2018). La stabilisation à la chaux crée souvent des réactions pouzzolaniques qui engendrent des composés semblables au ciment (Amhadi et Assaf 2018). La chaux vive est plus efficace et plus couramment utilisée. Ses avantages, par rapport à la chaux hydratée, sont les suivants (Amhadi et Assaf 2018):

- Il se caractérise par une forte teneur en chaux libre et densité élevée.
- Il est généralement moins poussiéreux.
- Il génère de la chaleur en présence de l'eau et réduit le degré de l'humidité du sol.

Les sols argileux ont la propriété de pouvoir échanger une partie de leurs cations et de fixer les ions de calcium. Lorsque la chaux est ajoutée aux sols argileux, en présence de l'eau, l'échange cationique commence à produire immédiatement après le mélange. La première réaction qui se produit est une réaction d'hydratation, conduisant à la formation de chaux hydratée dans le système hydrique argileux (Bessaim et al. 2018). Cette réaction entraîne une augmentation du pH. En effet, la dissolution de la chaux dans un sol argileux hydraté libère des cations du calcium Ca^{2+} et des hydroxyles $(\text{OH})^-$ comme suit:



L'échange de cations conduit à une réduction de l'épaisseur de la double couche entourant les particules d'argile due aux ions de calcium libérés de la chaux qui tendent à remplacer les cations échangeables de l'argile. Ceci conduit les particules à se rapprocher les unes aux autres et provoque la floculation et l'agglomération des minéraux argileux (Locat et al. 1990; Khattab et Adrees 2002; Cabane 2004; Rao et Shivananda 2005; Al-Mukhtar et al. 2012; Al-Swaidani et al. 2016; Amadi et Okeiyi 2017; Vitale et al. 2017; Dhar et Hussain 2019).

Lorsque des quantités adéquates de chaux et d'eau sont ajoutées, le pH du sol augmente rapidement au-dessus de 10.5. Ceci permet aux particules d'argile de se décomposer. La silice et l'alumine sont libérées et réagissent avec le calcium de la chaux pour former des hydrates de silicate de calcium (CSH) et des hydrates d'aluminate de calcium (CAH). CSH et CAH sont des produits cimentaires similaires à ceux formés dans le ciment (Dash et Hussain 2012 ; Vitale et al. 2017 ; Al-Swaidani et al. 2016). Ces produits cimentaires forment la matrice qui contribue à augmenter la résistance des couches de sol stabilisées à la chaux. Au fur et à

mesure que cette matrice se forme, le sol est transformé d'un matériau granulaire en une couche dure, relativement imperméable, avec une capacité de charge importante. La matrice formée est permanente, durable et produisant une couche structurelle solide.

L'amélioration des propriétés d'ingénierie du loess par l'addition de la chaux est examinée par plusieurs chercheurs. Les différentes études ont montré que l'ajout de la chaux induit une augmentation de la résistance et une diminution du potentiel de collapsibilité.

Hosseini et al. (2012) ont étudié en laboratoire l'effet de l'addition de différents pourcentages de chaux dans le but de stabiliser les sols loessiques, en augmentant la résistance au cisaillement du sol. Les résultats de l'étude ont montré qu'avec le temps, le potentiel de collapsibilité est fortement diminué. Avec l'augmentation du pourcentage de la chaux, la teneur en eau optimale est augmentée. Cependant, la densité sèche maximale, la limite de liquidité et l'indice de plasticité sont diminués. Les auteurs ont noté également que les résultats des essais de cisaillement direct révèlent, une augmentation de la résistance au cisaillement du sol dû à l'augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement du sol.

Haeri et al. (2015) ont rapporté que la résistance à l'effondrement du loess traité à chaux dépend fortement du temps de durcissement et de la quantité de chaux utilisé. Sur la base des résultats des tests de résistance à la compression non confinés, un pourcentage optimal de chaux a été déterminé. Ils ont observé que l'ajout de la chaux jusqu'à 3% augmente la résistance à la compression du loess. De plus de 3% de chaux, aucun changement considérable n'est observé. Pour assurer une meilleure résistance, ils ont noté que la teneur optimale de la chaux ajoutée au loess de Gorgan (Iran) est de 3%.

Pei et al. (2015) ont montré que l'addition de la chaux est une méthode de stabilisation pratique et efficace pour améliorer les performances de l'effondrement du loess. Dans cette étude, l'effet de la chaux sur les propriétés physico-chimiques, est examiné. Les résultats des tests ont montré une augmentation de la teneur en eau, la limite de liquidité, la surface spécifique et la capacité d'échange cationique (CEC). Tandis que la densité et l'indice de plasticité sont diminués. Les diffractogrammes du loess stabilisé à chaux montrent la génération de nouveaux minéraux dus à l'hydratation et aux réactions pouzzolaniques.

L'étude de Zhang et al. (2017) a révélé que les propriétés physico-chimiques et mécaniques du loess traité à la chaux sont modifiées lors de la réaction d'hydratation et de la réaction pouzzolanique. Ceci a provoqué la formation d'agrégats et de nouveaux minéraux cimentaires, dû à la floculation induite par l'échange cationique. Les auteurs ont montré qu'à court terme, qu'une portion de 5% de la chaux présente un pourcentage optimal dans le loess

traité. À long terme, le développement de la réaction pouzzolanique conduisant au durcissement exige un temps requis de 28 jours.

Gao et al. (2018) ont étudié l'effet de la densité sèche et de la teneur en chaux sur les changements des limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage, la conductivité hydraulique et la microstructure (tests de MEB) du lœss Chinois. Les résultats indiquent que la conductivité hydraulique du lœss traité ou non à la chaux diminue avec l'augmentation de la densité sèche. La conductivité hydraulique la plus faible a été observée dans le lœss traité à 9% de la chaux. L'excès de chaux (plus de 9% de teneur en chaux) a considérablement augmenté la taille des pores, conduisant à une augmentation significative de la conductivité hydraulique. Les auteurs concluent qu'une portion de 9% de la chaux présente la teneur optimale pour traiter le lœss. De plus, l'analyse de la microstructure montre que la teneur en chaux affecte la conductivité hydraulique du lœss traité à la chaux en modifiant la structure du sol, en particulier, les propriétés des pores supérieurs à 8 μm .

La stabilisation à la chaux est largement utilisée dans l'amélioration des sols en particulier dans la construction des couches de chaussées. Jia et al. (2019) ont étudié l'effet de l'ajout de la chaux sur les propriétés mécaniques et la microstructure du lœss. En fonction de différents temps de durcissement, des essais de compression non confinés sont réalisés. La microstructure est également étudiée par microscopie électronique à balayage (MEB). Les résultats expérimentaux de ce travail ont révélé que, pour le durcissement à long terme (28 à 90 jours), la résistance à la compression du lœss augmente avec la teneur en chaux. La MEB a été utilisé pour montrer les changements de la microstructure du lœss stabilisé à la chaux avec l'augmentation du temps de durcissement.

III.3 Traitement du lœss par l'ajout de la bentonite

L'ajout de l'argile est une technique de stabilisation des sols effondrables utilisée en génie civil. Cette technique repose sur l'injection des particules d'argile afin d'augmenter la résistance mécanique du sol (Evstatiev 1988; Jefferson et al. 2005 ; Tabarsa 2018). L'argile utilisée couramment est la bentonite.

Le terme bentonite est utilisé pour la première fois pour une argile trouvée vers 1890 dans le tuf du crétacé supérieur près de Fort Benton, Montana (Sarkar et Bhowmick 2018). Par définition, la bentonite est un mélange de minéraux argileux, dans lequel la smectite est le principal minéral. La structure de la smectite comme la montmorillonite est composée de deux unités structurales, le tétraèdre de silice et l'octaèdre d'alumine. Ces unités sont

interconnectées et s'étendent pour former des couches d'environ 10 Å d'épaisseur (Hicher et al. 2000).

La bentonite a une grande variété d'utilisation : construction, génie civil, l'industrie pharmaceutique, agriculture, les utilisations et les applications industrielles (fonderie, boue de forage). Dans le domaine de la construction en génie civil, la bentonite est utilisée, en raison de sa viscosité et plasticité, comme agent thixotrope, support, et lubrifiant dans les fondations et les parois moulées, dans les tunnels et dans les forages. Elle est également utilisée dans le ciment Portland et les mortiers. La bentonite se caractérise par une haute capacité de rétention d'eau, des propriétés d'absorption et d'adsorption. Elle peut absorber jusqu'à 10 fois son poids en eau et gonfler jusqu'à 18 fois son volume sec. En raison de leurs capacités d'hydratation et de déshydratation, elle possède de nombreuses propriétés utiles pour stabiliser les sols liquéfiés. Elle est donc utilisée comme liants, plastifiants et lubrifiants (Evstatiev 1988; Firoozi et al. 2017). L'injection de l'argile dans le loess peut réduire donc la porosité, diminuer ou éliminer la collapsibilité et augmenter le module de déformation (Evstatiev 1988; Jefferson et al. 2005).

En appréhendant de l'amélioration de la résistance mécanique du sol, plusieurs chercheurs ont examiné l'ajout de la bentonite sur les propriétés d'ingénierie des sols loessiques et sableux effondrables à faible cohésion. Les différentes recherches ont révélé que l'ajout de la bentonite entraîne une modification de la plasticité, améliorer la compressibilité et la résistance au cisaillement, et augmenter la teneur en eau optimale, la valeur de CBR et la cohésion.

Liu et al. (2004) ont utilisé la bentonite comme un additif pour améliorer les performances mécaniques et hydrauliques du loess. Avec l'augmentation de la teneur en bentonite, les auteurs ont constaté que la résistance à la compression du loess augmente. En outre, la conductivité hydraulique diminue.

Jawad (2009) a examiné l'amélioration des propriétés d'ingénierie d'un sol sableux par l'ajout de la bentonite. L'effet de la bentonite a été étudié sur les caractéristiques de résistance au cisaillement et la densité sèche maximale dans la stabilisation des structures de fondations. Dans cette étude, l'auteur a constaté que la bentonite peut améliorer la cohésion des sols sableux. Cette amélioration est consacrée par l'augmentation de la plasticité, la densité et la cohésion (c), et la diminution de l'angle de frottement. L'auteur a constaté ainsi que l'ajout de 7.5% de bentonite donne les meilleurs résultats.

Alercia et al. (2015) ont relevé que les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols loessiques sont modifiées par l'addition de la bentonite. Dans ce travail, des tests de perméabilité et de compression ont été effectués. Les auteurs ont constaté que la perméabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en bentonite. De plus, la résistance à la compression augmente à 400%.

Dans le domaine de la construction des structures de bâtiments, Daud (2018) a étudié l'amélioration des propriétés des sols à faible cohésion par l'ajout de la bentonite. Différentes proportions de bentonite ont été expérimentés. L'auteur a constaté que l'ajout de la bentonite renforce et améliore les propriétés d'ingénierie des sols. Les résultats de ce travail montrent que le traitement par la bentonite induit une augmentation de la densité sèche maximale et de la résistance au cisaillement d'environ 70%. Il indique qu'une teneur de 9% en bentonite présente une valeur optimale qui donne les meilleurs résultats.

Firoozfar et Dousti (2019) ont constaté que les pores inter-particules des sols effondrables diminuent avec l'ajout de 3% de bentonite. Cette diminution est due à la capacité d'absorption d'eau et au gonflement de la bentonite qui provoque la formation de gel entre les particules. Les auteurs ont noté que la bentonite agit comme un agent de remplissage des pores qui réduit le potentiel d'effondrement du sol.

Wahba et al. (2020) ont évalué l'effet de l'addition de la bentonite sur les propriétés physico-chimiques et la microstructure du sol sableux. Ils ont constaté que la bentonite augmente la capacité d'échange ionique, ce qui augmente la capacité de rétention d'eau du sol.

III.4 Conclusion

L'analyse présentée dans ce chapitre a montré que le traitement par l'addition des ajouts cimentaires tels que la chaux et la bentonite a été prouvé par plusieurs chercheurs. L'ajout des additifs permet l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques du loess en termes de création de nouvelles liaisons inter-particulaires. Cela peut améliorer la cohésion entre les particules, augmenter la résistance du sol et réduire le potentiel de collapsibilité.

Partie expérimentale

Chapitre IV

Caractérisation physico-
chimique des échantillons du
loëss étudié

IV.1 Introduction

Dans le cadre de l'étude du lœss désertique de l'Afrique du Nord, et plus du lœss Tunisien (Coudé-Gaussen 1987) et Libyen (Assallay et al. 1996), le lœss Algérien mérite intérêt examen et exploration. C'est dans ce cadre qu'on s'intéresse aux dépôts lœssiques de la région de Ghardaïa (Metlili et de Daïa Ben Dahoua). Les dépôts lœssiques de la région de Ghardaïa sont considérés comme prototypes du lœss Algérien. Ce chapitre est consacré à la méthode et les outils d'identification et la caractérisation géotechnique du lœss de Ghardaïa.

Dans le but d'examiner et valoriser les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des échantillons du lœss Algérien, plusieurs tests de laboratoire sont effectués. L'ensemble des tests comprend la distribution granulométrique, les limites d'Atterberg, l'équivalent de sable, la teneur en carbonate de calcium, la valeur du bleu de méthylène, le pH et la conductivité électrique. La composition chimique et minéralogique est également examinée. Par ailleurs, les propriétés mécaniques des échantillons du lœss sont déterminées par des tests de cisaillement direct et de compactage.

IV.2 Echantillonnage et localisation géographique des échantillons du lœss étudiés

Deux échantillons du lœss sont prélevés à partir de deux sites différents. Le premier prélèvement est effectué au niveau du site de Daïa Ben Dahoua situé à environ 10 km au Sud-ouest de la ville de Ghardaïa. Il est désigné par (S_1). Le deuxième est celui du site de Metlili situé à environ 42 km au Nord-ouest de la ville de Ghardaïa, noté par (S_2) (Figure IV.1). Les échantillons sont extraits à une profondeur d'environ 0.8 à 01 mètre

Le choix de ce site est justifié du fait que la région de Ghardaïa contient en abondance ce type de sol. En effet, l'analyse de la carte du relief de la région de Ghardaïa, relève l'existence de dépressions au niveau des sites faisant l'objet des prélèvements (Figure IV.1). Ce genre de dépression favorise les dépôts éoliens, notamment celui du type lœssique.

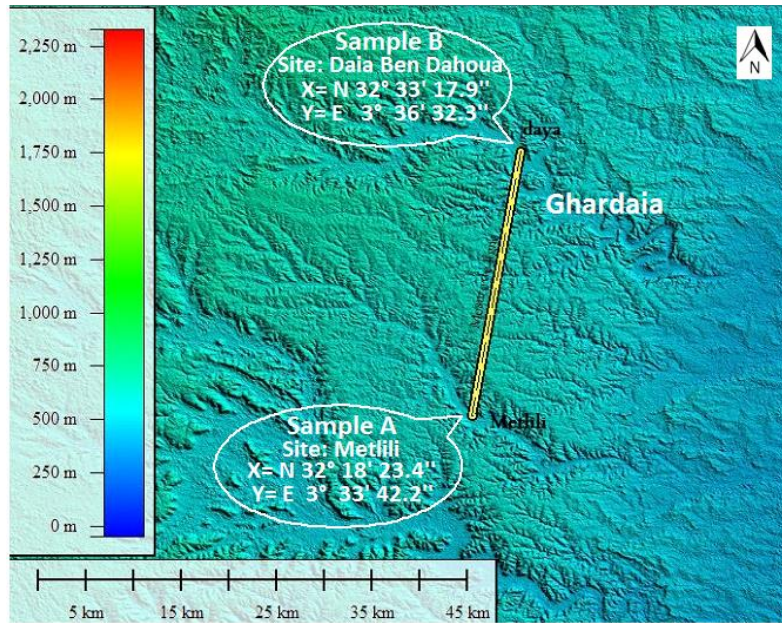


Figure IV.1. Localisation des sites de prélèvement

IV.3 Propriétés physico-chimiques des échantillons

IV.3.1 La teneur en eau naturelle

La teneur en eau naturelle est le paramètre le plus important. On désigne par teneur en eau, la quantité d'eau contenue dans un échantillon de sol. Elle est calculée par rapport à la masse de sol sec et exprimée en pourcentage. L'essai qui lui correspond porte comme référence à la norme française NF P 94-050. Il consiste à mesurer la perte d'eau d'un échantillon représentatif après séchage à l'étuve jusqu'à l'obtention d'une masse constante à une température de 105 °C. En cas de présence des minéraux sensibles à la chaleur, la mesure se fait à 50 °C. On compare ensuite cette masse d'eau évaporée à la masse des solides obtenus après séchage. La masse humide de l'échantillon prélevé pour l'essai dépend de la grosseur maximale des particules de sol.

La teneur en eau est généralement exprimée en pourcent et définie par:

$$\omega (\%) = \frac{\text{masse de l'eau}}{\text{masse du sol sec}} \times 100$$

Expression des résultats

Les résultats obtenus de la teneur en eau naturelle des deux échantillons du loess (S_1) et (S_2) sont respectivement 2 % et 1 %.

IV.3.2 Masse volumique des échantillons

IV.3.2.1 Masse volumique totale (Méthode géométrique)

La masse volumique d'un sol est le quotient de la masse (m) du sol par le volume (V) qu'il occupe. La masse volumique totale des échantillons est déterminée par la méthode géométrique. Cet essai a fait l'objet de la norme française NF P 94-053. L'essai consiste à mesurer successivement les paramètres masse et volume qui caractérisent l'échantillon du sol. La masse de l'échantillon est obtenue par pesage. Le volume est calculé à partir des données géométriques du moule qui contient l'échantillon.

La masse volumique totale ρ est déterminée par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

Avec:

m_1 : Masse du moule + la masse de l'échantillon (g).

m_2 : Masse du moule (g).

V : volume du moule (cm³).

Présentation des résultats

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats des essais réalisés:

Tableau IV.1. Résultats de la détermination de la masse volumique totale de l'échantillon (S₁)

Paramètres	Echantillon (S ₁)	
	Essai 1	Essai 2
Masse du moule (g)	7000	7000
Masse du moule + la masse de l'échantillon (g)	8375.4	8372.5
Masse de l'échantillon (g)	1375.4	1373.5
Volume du moule (cm ³)	944	944
Masse volumique totale ρ (g/cm ³)	1.456	1.454
Moyenne (g/cm ³)	1.455	

Tableau IV.2. Résultats de la détermination de la masse volumique totale de l'échantillon (S₂)

Paramètres	Echantillon (S ₂)	
	Essai 1	Essai 2
Masse du moule (g)	7000	7000
Masse du moule + la masse de l'échantillon (g)	8172.2	8175.6
Masse de l'échantillon (g)	1172.2	1175.6
Volume du moule (cm ³)	944	944
Masse volumique totale ρ (g/cm ³)	1.241	1.245
Moyenne (g/cm ³)	1.243	

D'après les résultats obtenus, la masse volumique totale des échantillons (S₁) et (S₂) est 1.5 (g/cm³) et 1.24 (g/cm³), respectivement.

IV.3.2.2 Masse volumique sèche ρ_d

La masse volumique sèche ρ_d des échantillons est calculée selon la loi suivante :

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+\omega} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Avec :

ω : Teneur en eau de l'échantillon.

ρ : Masse volumique totale.

L'application numérique donne les résultats présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3. Résultats de la masse volumique sèche des échantillons

Echantillon	(S ₁)	(S ₂)
Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	1.47	1.23

IV.3.2.3 Masse volumique des grains solides

La masse volumique des grains solides d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, dont on déduit tous les vides, aussi bien des vides entre les grains. Elle peut être déterminée à l'aide d'un pycnomètre. L'essai qui lui correspond porte la norme française NF P 94-054. Le matériel requis pour la déterminer ce paramètre est constitué d'un pycnomètre, d'une étuve de 60 °C à 105 °C et d'une balance. La formule utilisée pour calculer le poids spécifique est:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_3 - m_1 \rho_\omega}{m_2 - m_1 - m_4 + m_3} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

M_1 : Masse de pycnomètre.

M_2 : Masse de (pycnomètre + eau).

M_3 : Masse de (pycnomètre + échantillon).

M_4 : Masse de (pycnomètre + échantillon+ eau).

$\rho_w = 0.9978 \text{ g/cm}^3$ pour une température de 22° .

Présentations des résultats

Pour les deux échantillons du lœss (S_1) et (S_2), les résultats de la masse volumique des grains solides obtenus sont présentés au Tableau (IV.4).

Tableau IV.4. Résultats de la masse volumique des grains solides des échantillons étudiés

Echantillon	(S_1)	(S_2)
Masse de pycnomètre vide m_1 (g)	207	207
Masse de pycnomètre + eau m_2 (g)	722	722
Masse pycnomètre + échantillon m_3 (g)	307	307
Masse pycnomètre + échantillon + eau m_4 (g)	784.5	785.9
Masse volumique des grains solide (g/cm^3)	2.67	2.77

IV.3.3 Indice des vides (e)

L'indice des vides est défini comme étant le rapport entre le volume des vides et le volume des particules solides. Il permet de savoir si notre matériau est serré ou lâche. Il est déterminé par la relation suivante :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés (ρ_s et ρ_d) selon la formule :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

Vu que les masses volumiques sont déterminées, on déduit l'indice des vides par la deuxième relation. L'indice de vides des deux échantillons (S_1) et (S_2) est 0.82 et 1.25, respectivement.

IV.3.4 Degré de saturation (S_r)

Le degré de saturation, noté (S_r), indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides. Il s'exprime en pourcentage. Le degré de saturation peut varier de 0 % (sol sec) à 100 % (sol saturé).

Il peut aussi être défini par la formule suivante :

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} \times \frac{\omega}{e} \times 100$$

Pour les deux échantillons (S_1) et (S_2), le degré de saturation est de 6.51 % et 2.22 %, respectivement.

D'après la classification de Terzaghi, les deux échantillons du lœss sont légèrement humides (Tableau IV.5).

Tableau IV.5. Degré de saturation d'après Terzaghi

Sr (%)	Nature du sol
0	Sec
1-25	Légèrement humide
26 - 50	Humide
51- 75	Mouillé
76 - 99	Détrempé
100	Saturé

IV.3.5 Porosité n

La porosité est le rapport du volume des vides (V_v) au volume total (V). Elle peut s'exprimer en pourcentage ou sans dimension.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

La porosité est donnée par la formule suivante :

$$n = \frac{e}{(e+1)} \times 100$$

Par calcul, la porosité des deux échantillons (S_1) et (S_2) est de 45.05% et 55.55%, respectivement.

IV.3.6 L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer quantitativement la distribution des particules du sol par classes de diamètre. La répartition des différentes fractions granulométriques permet de classer le sol dans une classe de texture donnée, qui définit certains paramètres de comportement physique. Deux types d'essais sont envisagés :

- Par tamisage (par voie humide ou sèche) pour les éléments de diamètre supérieur à 80 μm .
- Par sédimentométrie pour les éléments de diamètre inférieur à 80 μm .

L'analyse granulométrique par tamisage a fait l'objet de la norme française (NF P94-056). Elle consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires, de taille décroissante. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de

graphique qui est donné en fonction de diamètre des grains. La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 80 μm . La séparation par décantation consiste à déterminer les diamètres équivalents des particules sphériques en fonction de leur vitesse de chute dans un environnement visqueux (eau) afin d'obtenir le tracé d'une courbe granulométrique pour des particules inférieures à 0.08 mm. Cet essai est réalisé suivant la norme française (NF P94-057).

Expression des résultats

Pour les deux échantillons (S_1) et (S_2), les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés dans la Figure (IV.2).

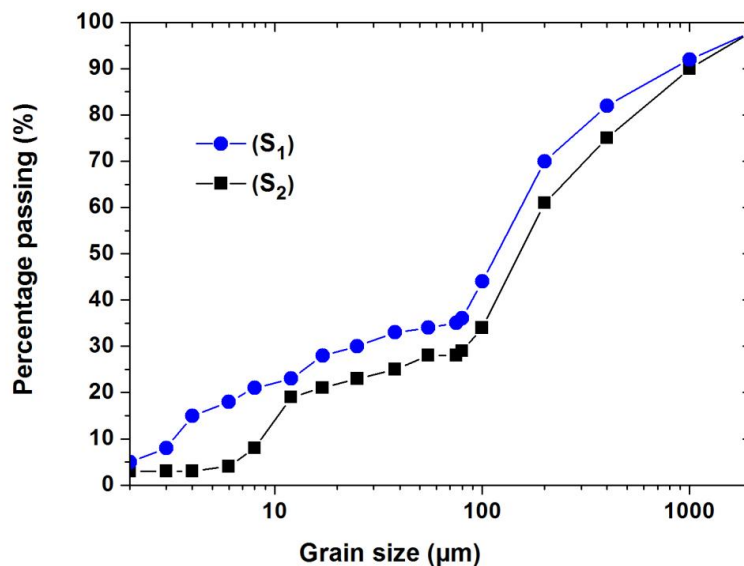


Figure IV.2. Courbes granulométriques des échantillons du lœss étudiés

Les courbes granulométriques des échantillons indiquent que l'échantillon (S_1) est constitué de 64% de sable, 28% de limon, 06% d'argile et 02% de sable grossier. L'échantillon (S_2) est plus sableux, avec 70% de sable, 25% de limon, 03% d'argile et 02% de sable grossier. En référence aux travaux de Coudé-Gaussen (1987), la granulométrie des échantillons explorés semblent similaires au lœss du sud Tunisien. Elle confirme le constat de l'auteur qui atteste que le lœss de l'Afrique du Nord est plus grossier. En proportions gardées, la composition granulométrique du lœss de Ghardaïa est très proche à celle de la Tunisie. Cette dernière se compose de sable fin (plus de 60%), de limon plutôt grossiers (25 - 30%), d'argile (5 -15%), et de sable grossier (moins de 5%) (Coudé-Gaussen, 1991). Toutefois, l'examen de la

granulométrie du lœss de la Lybie indique que ce dernier est plus fin. Les travaux d'Assallay (1998) montrent que la composition de la fraction fine dans le lœss Libyen est de 60% à 90%. Au Moyen-Orient, le lœss d'Émirats Arabes Unis est plus sableux et moins grossier (85% des grains sont inférieurs à 125 μm) (Goudie et al. 2000).

Le tableau (IV.6) présente la composition des grains du lœss dans différentes régions du monde.

Tableau IV.6. Composition du lœss dans différentes parties du monde

Localisation	Composition (%)			Classification	Référence
	Sable	Limon	Argile		
L'Amérique (Mississippi)	0-8	75-85	0-25	Lœss limoneux	Sheeler (1968)
Pologne	11-19	73-76	8-10		Grabowska-Olszewska (1988)
Iran (Golestan Province)	1-14	62-89	10-37		Rezaei et al. (2011)
Lybie (Gharyan)	38	51	11	Lœss limoneux	Assallay et al. (1996)
Tunisie (Matmata)	35-67	7-25	2-29	Lœss limoneux	Mtimet (1992)
Algérie (S ₁)	64	28	06	Lœss limoneux	Présente étude
Algérie (S ₂)	70	25	03	Lœss sableux	

Les résultats présentés dans le tableau confirment les constatations de Coudé-Gausson (1987) relatifs au caractère prédominance de la fraction grossière du lœss de l'Afrique du Nord. Les mêmes résultats relèvent la prédominance de la fraction fine dans des régions d'Amérique, de l'Europe et du sud Asiatique.

IV.3.7 L'essai de consistance des sols (Limites d'Atterberg)

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales qui marquent les seuils entre le passage d'un sol de l'état solide à l'état plastique et de l'état plastique à l'état liquide. Ces deux limites sont utilisées afin de déterminer la classification des sols. On utilise généralement les limites définies par Atterberg et précisées ensuite par Casagrande. Cet essai a fait l'objet de la norme française (NF P94-051). Il s'effectue sur la fraction 0/400 μm . Il consiste à déterminer :

Limite de liquidité (ω_l):

La limite de liquidité ω_l (%) est la teneur en eau ω (%) qui correspond à une fermeture de 1 cm en 25 coups. On utilise un appareil conforme aux spécifications qui porte le nom de Casagrande.

Limite de plasticité (ω_p):

La limite de plasticité ω_p est la teneur en eau du rouleau qui se brise en petits tronçons de 10 à 20 mm de longueur au moment où son diamètre atteint 3 mm.

L'essai consiste à :

- Prélever un échantillon d'environ 30 g de sol étudié.
- Rouler l'échantillon sur la surface de roulement avec la paume de la main de manière afin d'obtenir un rouleau de 3 mm de diamètre uniforme et d'environ 10 cm de longueur.
- Lorsque le rouleau de 3 mm de diamètre brise ou effrité en morceaux, on le place dans un récipient afin de déterminer sa teneur en eau. On exécute en général deux essais pour déterminer cette limite.

Indice de plasticité I_p :

À partir de ces limites, on définit les indices de plasticité I_p et de consistance I_c .

L'indice de plasticité I_p est la différence entre la limite de liquidité et celle de plasticité. Il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation :

$$I_p = \omega_l - \omega_p (\%)$$

Présentation des résultats

Pour les deux échantillons (S_1) et (S_2), les tableaux (IV.7) et (IV.8) regroupent les résultats des limites de liquidité obtenus.

Tableau IV.7. Résultats de la limite de liquidité de l'échantillon (S_1)

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Nombre de coups	15	20	25	30	35
N° de la tare	32	3	21	4	89
Poids total humide (g)	11.36	11.33	11.59	11.50	11.22
Poids total sec (g)	9.81	9.76	10.04	9.95	9.84
Poids de la tare (g)	4.20	3.79	4.08	3.77	4.25
Poids de l'eau	1.55	1.57	1.55	1.55	1.38
Poids du sol sec (g)	5.61	5.97	5.96	6.18	5.59
Teneur en eau (%)	27.62	26.29	26.00	25.08	24.68

Tableau IV.8. Résultats de la limite de liquidité de l'échantillon (S_2)

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Nombre de coups	15	20	25	30	35
N° de la tare	29	11	95	53	25
Poids total humide (g)	11.43	12.48	11.88	11.56	10.27
Poids total sec (g)	10.29	11.21	10.69	10.42	9.37
Poids de la tare (g)	3.93	4.1	3.89	3.79	3.93
Poids de l'eau	1.14	1.27	1.19	1.14	0.9
Poids du sol sec (g)	6.36	7.11	6.8	6.03	5.44
Teneur en eau (%)	17.92	17.86	17.5	17.19	16.54

Les résultats de la limite de plasticité des échantillons (S_1) et (S_2) sont donnés respectivement dans les Tableaux (IV.9) et (IV.10).

Tableau IV.9. Présentation les résultats de la limite de plasticité de l'échantillon (S₁)

	Essai 1	Essai 2
N° de la tare	1	2
Poids total humide (g)	7.37	7.25
Poids total sec (g)	6.79	6.72
Poids de la tare (g)	3.70	3.94
Poids de l'eau	0.58	0.53
Poids du sol sec (g)	3.09	2.78
Teneur en eau (%)	18.77	19.06
ω_p moyenne (%)	18.91	

Tableau IV.10. Présentation les résultats de la limite de plasticité de l'échantillon (S₂)

	Essai 1	Essai 2
N° de la tare	1	2
Poids total humide (g)	6.53	7.47
Poids total sec (g)	6.13	7
Poids de la tare (g)	3.43	3.77
Poids de l'eau	0.4	0.47
Poids du sol sec (g)	2.7	3.23
Teneur en eau (%)	14.81	14.55
ω_p moyenne (%)	14.81	

D'après les résultats expérimentaux obtenus, le calcul des indicateurs des propriétés de plasticité des deux échantillons sont donnés dans le tableau (IV.11).

Tableau IV.11. Propriétés de plasticité des échantillons du loess (S₁) et (S₂)

Propriétés de plasticité	(S ₁)	(S ₂)
Limite de liquidité ω_l (%)	26.32	17.52
Limite de plasticité ω_p (%)	18.91	14.81
Indice de plasticité I_p (%)	7.41	2.71

Interprétation des résultats

Pour l'échantillon (S₁), les valeurs de la limite de liquidité ω_l et l'indice de plasticité I_p sont respectivement 26 % et 7 %. Pour le loess (S₂), la limite de liquidité est de 18 % et l'indice de plasticité est de 3 %. La valeur de l'indice de plasticité reste inférieure à 10 %. Ceci indique que l'activité argileuse dans les deux échantillons est faible. Sur le graphique de Casagrande, les valeurs de plasticité des échantillons (S₁) et (S₂) se positionnent au-dessous de la ligne caractéristique A et avant la ligne verticale de 50 % (Figure IV.3).

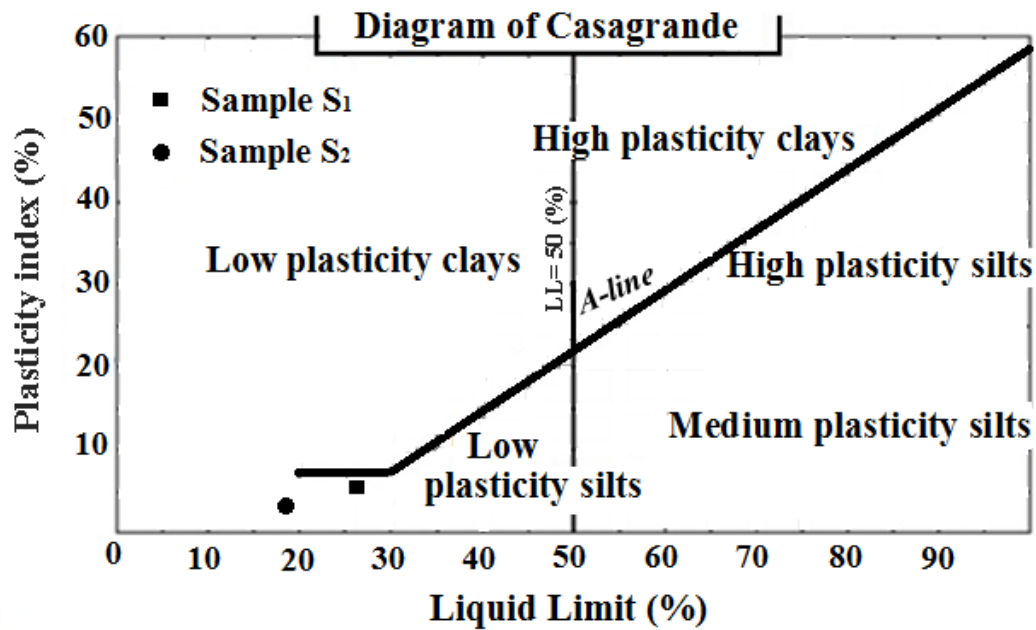


Figure IV.3. Classification des échantillons du loess sur le Diagramme de l'abaque de Casagrande

Il ressort de la même figure que les deux échantillons sont des sols limoneux à faible plasticité. Basé sur les critères donnés par Gibbs et Holland (1960), le loess de Ghardaïa est classé en deux types : un loess limoneux pour le cas du site (S₁), et sableux pour celui du site (S₂) (Figure IV.4).

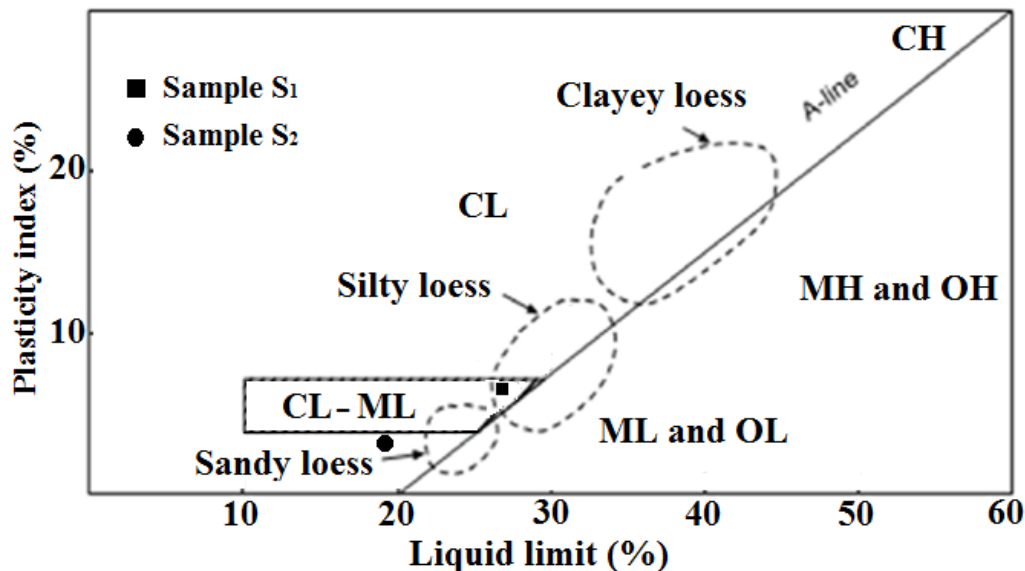


Figure IV.4. Propriétés de plasticité des échantillons du loess selon la classification définie par Gibbs et Holland (1960)

Le tableau (IV.12) donne une comparaison sommaire avec les résultats obtenus pour d'autres sols provenant de nombreuses régions du monde.

Tableau IV.12. Propriétés de plasticité du lœss de nombreuses régions du monde

Localisation	ω_l (%)	ω_p (%)	I_p (%)	Classification (USCS)	Références
Chine	29-32	12-22	10-17		Derbyshire et Mellors (1988)
Bretagne	28-46	17-23	9-28		Derbyshire et Mellors (1988)
USA (Mississippi)	23-43	17-29	2-20	ML-CL	Sheeler (1968)
Tunisie (Matmata)	19-27.5	15-21	2.5-7		Mtimet (1992)
Lybie (Garaboli)	25	17	8	ML-CL	Assallay et al. (1996)
Iran	7-26	3-8	4-18	CL	Rezaei et al. (2011)
Algérie (S ₁)	26	19	7	ML-CL	Présente étude
Algérie (S ₂)	18	15	3	ML-CL	

USCS : Unified Soil Classification System

La comparaison relève que les propriétés de plasticité du lœss Algérien sont semblables à celles du lœss de nombreuses régions du monde.

IV.3.8 Essai d'équivalent de sable

Cet essai a fait l'objet de la norme française (NF EN 933-8). Il consiste à déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci. Cet essai consiste à faire flocculer, dans des conditions normalisées de temps et d'agitation, les impuretés du sable. L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau étudié. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout pendant 20 minutes et on mesure les éléments suivants :

$$ES = (H_2/H_1) \times 100 \text{ (\%)}$$

Hauteur H_1 : sable propre + éléments fins.

Hauteur H_2 : sable propre seulement.

Expression des résultats

Pour les échantillons explorés, les résultants des valeurs d'équivalent de sable obtenus sont regroupés dans le Tableau (IV.13). Le tableau indique que les valeurs d'équivalent de sable de (S₁) et (S₂) sont respectivement 9.7 % et 16.84 %.

Tableau IV.13. Résultats de l'essai d'équivalent de sable des deux échantillons (S₁) et (S₂)

Echantillon	(S ₁)		(S ₂)	
Hauteur totale H ₁ (cm)	29.5	29.2	32.2	31.1
Hauteur de sable H ₂ (cm)	3	2.7	5.3	5.7
$ES = \frac{H_2}{H_1} \times 100$	10.16	9.24	16.46	17.22
ES moyen (%)	9.7		16.84	

En tenant compte des valeurs d'équivalent de sable et en référence à la classification notée sur le Tableau (IV.14), les deux échantillons du loess sont classés parmi les sols plastiques.

Tableau IV.14. Classification des sols selon la valeur d'équivalent de sable (LCPC SETRA 1992)

Équivalent de sable (%)	Nature du sol
ES = 00	Argile pure
ES < 30	Sol plastique
30 < ES < 50	Sol généralement stabilisé
ES > 50	Sol facilement compacté
ES=100	Sable pure

IV.3.9 Essai de bleu de Méthylène

L'essai au bleu de méthylène, est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sol. Il consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans un échantillon de sol. Pour cela, on utilise du bleu de méthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles. L'essai a donc pour objet de mesurer la capacité d'adsorption du bleu de méthylène, c'est-à-dire la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-élémentaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses présentes dans une quantité de sol. Cet essai a fait l'objet de la norme française NF P 94-068. Il consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. L'essai est réalisé sur la fraction 0/5 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

Les calculs à exécuter sont donnés dans le tableau (IV.15).

Tableau IV.15. Calculs à exécuter de l'essai de bleu de méthylène

Teneur en eau de l'échantillon $\omega(\%)$ soumis à l'essai (0/5mm)	$\omega = \frac{mh - ms}{ms}$ mh: poids humide de l'échantillon. ms: poids sec de l'échantillon.
Masse sèche de la prise d'essai m_0 (g)	$m_0 = \frac{mh_1}{1 + \omega}$ mh ₁ : masse humide de la prise. ω : teneur en eau naturelle de la prise.
Masse de bleu introduire (solution à 10g/l) (g)	$B = V \times 0.01$ V : volume de solution de bleu injecté (cm ³).
Valeur de Bleu de Méthylène VBS (g/100g)	Si $D_{\max} < 5\text{mm}$: $VBS = \frac{B}{m_0} \times 100$
	Si $D_{\max} > 5\text{mm}$: $VBS = \frac{B}{m_0} \times C \times 100$ C: la proportion de la fraction 0/5mm dans la fraction 0/50mm du matériau sec.

Présentation des résultats

Pour les échantillons, les résultats de calcul de l'essai de bleu de méthylène sont présentés dans Tableaux (IV.16) et (IV.17).

Tableau IV.16. Résultats de l'essai de VBS de l'échantillon (S_1)

Teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5mm) (%)	$\omega = \frac{mh_2 - ms_2}{ms_2}$ $\omega = \frac{148.8 - 148.65}{148.65} \times 100$ $\omega = 0.1\%$
Masse sèche de la prise d'essai (g)	$m_0 = \frac{mh_1}{1 + \omega}$ $m_0 = \frac{100}{1 + 0.1}$ $m_0 = 99.9 \text{ g}$
Masse de bleu introduire (solution à 10g/l) (g)	$B = V \times 0.01$ $V = 75 \text{ cm}^3$ $B = 75 \times 0.01$ $B = 0.75$

Valeur de bleu de méthylène VBS (g/100g)	$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100$ $VBS = \frac{0.75}{99.9} \times 100$ $VBS = 0.75 \text{ (g/100g)}$
--	---

Tableau IV.17. Résultats de l'essai de VBS de l'échantillon (S₂)

Teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5mm) (%)	$\omega = \frac{mh_2 - ms_2}{ms_2}$ $\omega = \frac{131.4 - 131.27}{131.27} \times 100$ $\omega = 0.1\%$
Masse sèche de la prise d'essai (g)	$m_0 = \frac{mh_1}{1 + \omega}$ $m_0 = \frac{100}{1 + 0.1}$ $m_0 = 99.9 \text{ g}$
Masse de bleu introduire (solution à 10g/l) (g)	$V = 25 \text{ cm}^3$ $B = V \times 0.01$ $B = 25 \times 0.01$ $B = 0.25$
Valeur de bleu de méthylène VBS (g/100g)	$VBS = \frac{B}{m_0} \times 100$ $VBS = \frac{0.25}{99.9} \times 100$ $VBS = 0.25 \text{ (g/100g)}$

Pour les échantillons (S₁) et (S₂), les résultants des valeurs de bleu de méthylène sont respectivement 0.75 et 0.25 (g/100g). En considérant les valeurs de bleu de méthylène et en référence à la classification du tableau (IV.18), les deux échantillons du lœss sont classés parmi les sols limoneux.

Tableau IV.18. Classification des sols selon la valeur VBS (LCPC SETRA 1992)

Valeur de VBS	Type de sol
VB < 0.2	Sols sableux
0.2 < VB < 2.5	Sols limoneux
2.5 < VB < 6	Sols limoneux argileux
6 < VB < 8	Sols argileux
VB > 8	Sols très argileux

IV.3.10 Mesure de la teneur en carbonates de calcium CaCO_3

Pour définir la nature d'un échantillon de sol, la mesure de la teneur en carbonate de calcium est nécessaire. Le dosage du carbonate de calcium est basé sur l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCl) dilué d'un échantillon d'une masse donnée à pression et température constantes. C'est le principe utilisé par le calcimètre de Bernard. Cet essai a fait l'objet de la norme française NF P 94-048. Il consiste à déterminer le volume de CO_2 dégagé lors d'une réaction chimique de HCl sur les carbonates de calcium (CaCO_3) contenus dans un échantillon du sol.

Présentation des résultats

Si l'acide HCl est en excès, son action sur une mole de CaCO_3 (100 g/mol) libère une mole de CO_2 (22.4 l soit 22400 ml).

Masse de l'échantillon (S_1) = 1g

Niveau initial = 0 ml

Niveau final = 49.2 ml

Masse de CaCO_3	Volume de CO_2	
100 g	22400 ml	$x = (49.2 \times 100) / 22400$
x g	49.2 ml	$x = 0.22 \text{ g}$
Masse de CaCO_3	Masse de l'échantillon	
0.22 g	1g	$y = (0.22 \times 100) / 1$
y %	100 %	$y = 22 \%$

Masse de l'échantillon (S_2) = 1g

Niveau initial = 0 ml

Niveau final = 98.5 ml

Masse de CaCO_3	Volume de CO_2	
100 g	22400 ml	$x = (98.5 \times 100) / 22400$
x g	98.5 ml	$x = 0.44 \text{ g}$

Masse de CaCO_3	Masse de l'échantillon	
0.44 g	0.25g	$y = (0.44 \times 100) / 1$
y %	100 %	y = 44 %

Interprétation des résultats

Pour le lœss étudié, les résultats de la teneur en carbonate obtenu est de 22 % pour l'échantillon (S_1) et 44 % pour l'échantillon (S_2). Ces résultats reflètent la présence d'une quantité notable des grains de carbonate de calcium dans le lœss exploré avec une teneur plus importante dans l'échantillon (S_2) que (S_1). En considérant les valeurs de la teneur en carbonates de calcium et en se rapportant à la classification du guide technique (LCPC SETRA 1992), les résultats révèlent que les deux échantillons contiennent une argile marneuse ou limoneuse (Tableau IV.19).

Tableau IV.19. Classification des sols selon la teneur en CaCO_3 (LCPC SETRA 1992)

% (CaCO_3)	Nature du sol
0-10	Argile
10-30	Argile limoneuse
30-70	Marne
70-100	Calcaire

Gibbs et Holland (1960) affirment qu'en général, les supports inter-granulaires dans le lœss sont composés principalement d'argile montmorillonite, avec de petites quantités de l'illite. Les auteurs indiquent que les carbonates varient généralement entre 4 et 20% et servent comme structure secondaire. Le tableau (IV.20) donne une comparaison sommaire avec les résultats de carbonates obtenus pour d'autres sols provenant de nombreuses régions du monde.

Tableau IV.20. La teneur en CaCO_3 du lœss dans plusieurs parties du monde

Localisation	Teneur en CaCO_3	Références
Chine	3-20	Derbyshire et Mellors (1988)
Espagne	40-65	Coudé-Gaussen (1990)
Nord de Grèce	11	Coudé-Gaussen (1990)
Maroc	25-40	Grousset et al. (1992)
Tunisie	2-48	Mtimet (1992)
Algérie	22-44	Présente étude

Il ressort du tableau (IV.20) que les valeurs du lœss Algérien restent comparables à celles des extrêmes du reste du monde.

IV.3.11 Le pH et la conductivité électrique

Les mesures du pH et la conductivité électrique sont effectuées, en utilisant pH-mètre (modèle C863, Consort nv, Parklaan, Belgique) et conductimètre (modèle EC 215, Hanna Instruments, Woonsocket, Rhode Island, USA) selon ASTM D4972.

Les résultats obtenus indiquent que les valeurs du pH est de 8.4 pour l'échantillon du lœss (S₁) et 9.6 pour l'échantillon (S₂). Les deux échantillons sont donc des matériaux basiques. Les résultats obtenus sont en accord avec les résultats chimiques. Le pH du lœss (S₂) est supérieur à celui de (S₁). Cela s'explique par le fait que le lœss (S₂) est plus carbonaté par rapport au lœss (S₁). Généralement, le pH des sols calcaires varie entre 7 et 8. Il peut également atteindre un niveau supérieur à 8.5 (Yaalon 1957).

Quant aux expériences relatives à la conductivité électrique, les résultats indiquent une valeur de 2.9 mS/cm pour le lœss (S₁) et 3.3 mS/cm pour le lœss (S₂). La conductivité électrique, qui est utilisée pour évaluer la qualité de l'échantillon, est une propriété importante du sol. Il s'agit d'une mesure de la présence des ions présents en solution. En référence aux données du tableau (IV.21) qui illustre la classification de Durand (1983), les deux échantillons sont classés comme sols très salés.

Tableau IV.21. Qualité des sols suivant la valeur de la conductivité électrique

Classe	CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C	Qualité des sols
Classe I	0 à 500	Non salé
Classe II	500 à 1000	Légèrement salé
Classe III	1000 à 2000	Salé
Classe IV	2000 à 4000	Très salé
Classe V	Plus de 4000	Extrêmement salé

IV.3.12 Composition chimique et minéralogique

L'analyse chimique des échantillons est réalisée à l'aide d'un analyseur LAB-X3500 (Oxford Instruments Analytical, Oxfordshire, Angleterre), équipé d'un spectromètre à fluorescence X à dispersion d'énergie (EDXRF). Les résultats des échantillons examinés ainsi que ceux trouvés pour le lœss d'autres régions du monde sont présentés dans le tableau (IV.22).

Les résultats indiquent que la composition chimique des échantillons de la région de Ghardaïa est surtout siliceuse. Toutefois, il est à noter que la teneur en SiO₂ n'indique pas vraiment une différence significative entre les valeurs des deux échantillons examinés. Elle est de 53.97 % dans l'échantillon (S₁) et 49.68 % dans l'échantillon (S₂). Les résultats montrent que les deux

échantillons sont plus carbonatés et riches en calcite (21 % pour le lœss (S₁), 24 % pour le lœss (S₂)). En outre, la teneur en Fe₂O₃ se situe entre 1 % et 2 %. Par ailleurs, la teneur en aluminium ne dépasse pas 5 %.

Tableau IV.22. Composition chimique (%) du lœss dans différentes régions du monde

	Localisation					
	USA	Iran	China	Tunisie	(S ₁)	(S ₂)
Références	Pye	Rezaei et al.	Pecsi	Coudé-Gaussen	Présente étude	
	1987	2011	1990	1991		
Eléments chimiques						
SiO ₂	61.72	48.62	50	55-65	53.97	49.68
Al ₂ O ₃	7.92	11.21	10	5-8	5.19	3.39
Fe ₂ O ₂	3.02	4.50	3-6	-	2.37	1.78
CaO	8.26	13.36	7.5-10.5	10-25	21.57	24.84
MgO	4.23	1.43	1.5-5	1-1.85	0.80	0.57
K ₂ O	1.86	-	1.5-5	1.25	1.77	1.62
Na ₂ O	1.28	-	1.2-2.3	-	-	-
TiO ₂	0.62	-	-	0.4	-	-
MnO	0.07	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0.13	-	-	-	-	-
P.A.F	11.51	15.97			14.38	17.94
Total	100.62	95.09			100.05	99.82

L'examen du tableau (IV.22) indique aussi que les résultats obtenus pour les échantillons de l'Algérie sont généralement comparables à ceux de reste du monde. Le lœss du Mississippi et de la Chine sont comparativement plus riches en silicium. Ils sont par rapport au lœss Algérien moins carbonaté et légèrement plus riche en magnésium. Toutefois le lœss Iranien est assez plus carbonaté. Un aspect de similarité du lœss Algérien est observé avec le lœss de la région de Matmata (Sud Tunisien).

L'analyse minéralogique des deux échantillons du lœss (S₁) et (S₂) a été effectuée en utilisant un diffractomètre à rayons X (DRX) du type Rigaku Miniflex 600 (Rigaku, Tokyo, Japon), équipé d'un rayonnement Cu K α à 40 kV, 15 mA. Les échantillons sont ensuite scannés dans la plage 2 θ de 5° à 50° avec un pas de 0.02°. Les figures (IV.5) et (IV.6) représentent les résultats d'analyse diffractométrique. Ils montrent que les éléments prédominants dans les deux échantillons sont la silice et les carbonates. La silice est cristallisée sous forme de quartz (SiO₂) et les carbonates sous forme de calcites (CaCO₃). La diffraction donne simplement une idée des minéraux actuels. L'analyse de DRX relève que le lœss (S₁) est composé de quelques minéraux argileux de type montmorillonite et Halloysite. Le lœss (S₂) indique la présence de kaolinite et montmorillonite.

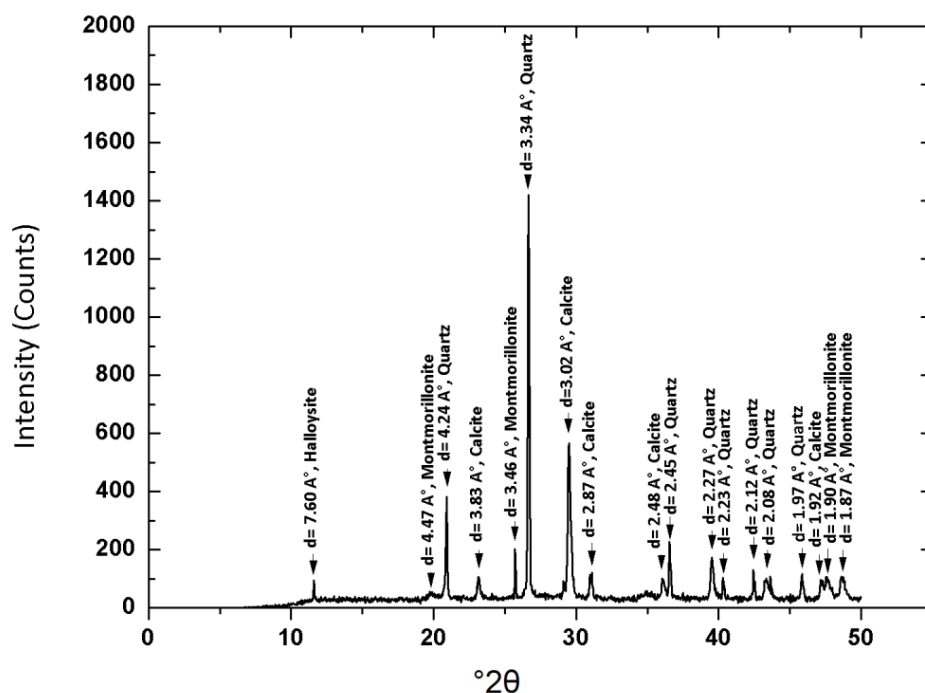


Figure IV.5. Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon (S₁)

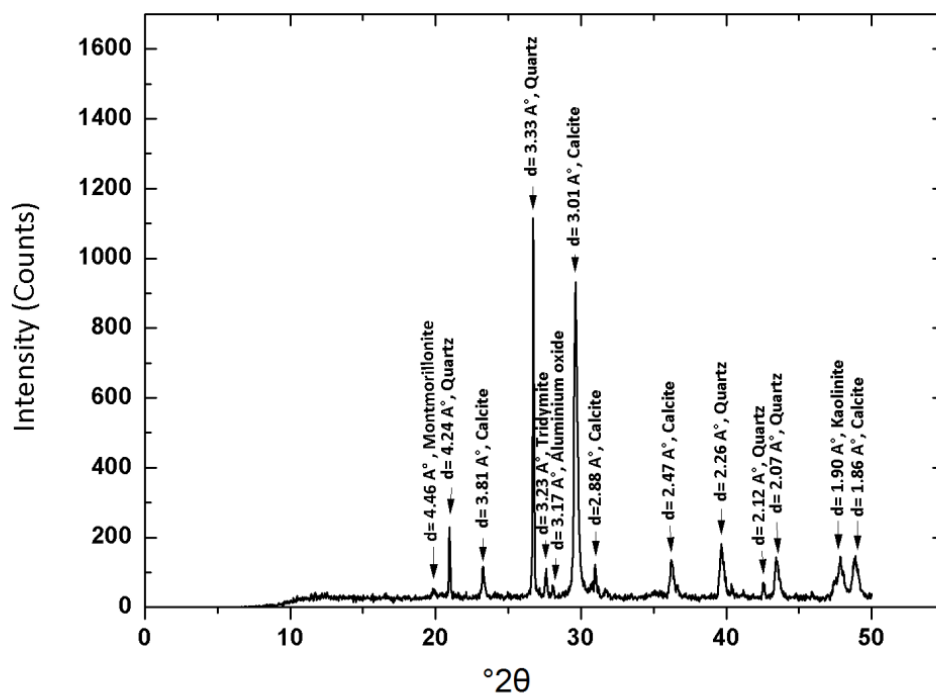


Figure IV.6. Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon (S₂)

Ces données sont cohérentes avec les résultats chimiques. De point de vue minéralogique, le lœss est principalement constitué de quartz, feldspaths et de minéraux argileux, avec diverses quantités de carbonate. Assallay (1998) a indiqué que le minéral dominant dans le lœss est le quartz (50 % à 80 %). Les autres constituants principaux sont les feldspaths (environ 25 %), les minéraux argileux et les carbonates. Le minéral argileux ne dépasse pas quelques pourcent. En revanche, Crouvi et al. (2010) ont indiqué que le lœss du désert est riche en quartz, et dans une moindre mesure en feldspath. Ils déclarent qu'il existe un bon accord entre la composition minéralogique du lœss saharien et celle du sable de dune. Les résultats de la minéralogie du lœss beige de la Tunisie, qui est comparativement similaire au lœss de Ghardaïa, sont riches en minéraux gonflants (kaolinite et illite). La palygorskite est plus abondante (20 % à 40 %) (Coudé Gaussen, 1987). Coudé Gaussen (1987) a montré que la forte teneur en minéraux gonflants et en palygorskite peut être expliquée par la contribution du vent.

IV.3.13 Essai de compactage

Pour assurer la stabilité des ouvrages de génie civil, il est important d'effectuer le processus de compactage du sol. On appelle compactage, l'opération qui consiste à accroître la densité du sol par des moyens mécaniques. Cette opération augmente la compacité et la résistance du sol. L'essai Proctor consiste à simuler le compactage en laboratoire pour déterminer les conditions optimales de mise en œuvre d'un matériau sur le chantier, afin de réaliser un bon compactage de remblai, couche de forme, corps de chaussée, plateforme, etc. Cet essai a fait l'objet de la norme française NF P 94-093.

Il consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes. On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe de la variation de la densité sèche γ_d en fonction de la teneur en eau ω . Cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau.

On distingue deux catégories de l'essai Proctor:

- **Essai Proctor Normal** : destiné à évaluer l'énergie nécessaire à un compactage modéré (pour remblai en terre, Ouvrage d'Art, Couche de forme). L'énergie de compactage est de 25 coups par couche.

- **Essai Proctor Modifié** : destiné à évaluer l'énergie nécessaire à un compactage maximum (couches de chaussées, plate-forme industrielle, etc.). L'énergie de compactage est de 56 coups par couche.

Pour chaque éprouvette compactée, il convient de calculer :

- La teneur en eau ω .
- Le poids volumique du matériau sec γ_d en tenant compte du volume réel du moule utilisé.

$$\gamma_d = \gamma_h / (1 + \omega)$$

$$\gamma_h = W / V_{\text{moule}}$$

W : poids du moule avec le sol – poids du moule.

$V_{\text{moule}} = 3.14 \times R^2 \times \text{Hauteur du moule}$, R : est le rayon intérieur du moule.

Présentations des résultats

Pour les deux échantillons (S_1) et (S_2), les résultats obtenus de l'essai Proctor modifié sont présentés respectivement dans les tableaux (IV.23) et (IV.24).

Tableau IV.23. Présentation les résultats de calcul de l'essai Proctor normal de l'échantillon (S_1)

	Echantillon 01	Echantillon 02	Echantillon 03	Echantillon 04	Echantillon 05
Quantité d'eau ajoutée (%)	6	8	10	12	14
Poids total humide(g)	13824.6	14034.67	14163.59	14172.91	14175
Poids du moule(g)	9520	9520	9520	9520	9520
Poids du sol humide(g)	4304.6	4514.67	4643.59	4652.91	4655
Volume du moule	2255	2255	2255	2255	2255
Masse volumique humide γ_h (g/cm ³)	1.91	2.00	2.05	2.06	2.06
Teneur en eau calculée	0.0605	0.0822	0.1012	0.1214	0.1405
Masse volumique sèche γ_d (g/cm ³)	1.80	1.85	1.87	1.84	1.81

Tableau IV.24. Présentation les résultats de calcul de l'essai Proctor normal de l'échantillon (S_2)

	Echantillon 01	Echantillon 02	Echantillon 03	Echantillon 04	Echantillon 05
Quantité d'eau ajoutée (%)	6	8	10	12	14
Poids total humide(g)	13759.4	13917.25	13714.3	13669.2	13624.1
Poids du moule(g)	9520	9520	9520	9520	9520
Poids du sol humide(g)	4239.4	4397.25	4194.3	4149.2	4104.1
Volume du moule	2255	2255	2255	2255	2255
Masse volumique humide γ_h (g/cm ³)	1.88	1.95	1.86	1.84	1.82
Teneur en eau calculée	0.061	0.0815	0.0104	0.01211	0.0141
Masse volumique sèche γ_d (g/cm ³)	1.77	1.80	1.84	1.82	1.79

Les courbes Proctor des deux échantillons (S_1) et (S_2) sont présentés dans la figure (IV.7).

Interprétation des résultats

L'examen de la figure (IV.7) révèle que les courbes ne se recoupent pas. Elles sont situées l'une au-dessus de l'autre. Pour l'échantillon (S_2), la densité sèche maximale (γ_{dmax}) vaut 1.84 g/cm³. Elle reste inférieure à la valeur de l'échantillon (S_1) qui est de 1.87 g/cm³. Les teneurs en eau ω_{opt} sont respectivement 10.4 % et 9.9 %. Donc, pour une même énergie de compactage, la valeur de la densité sèche maximale de l'échantillon (S_2) est légèrement inférieure à celle de (S_1).

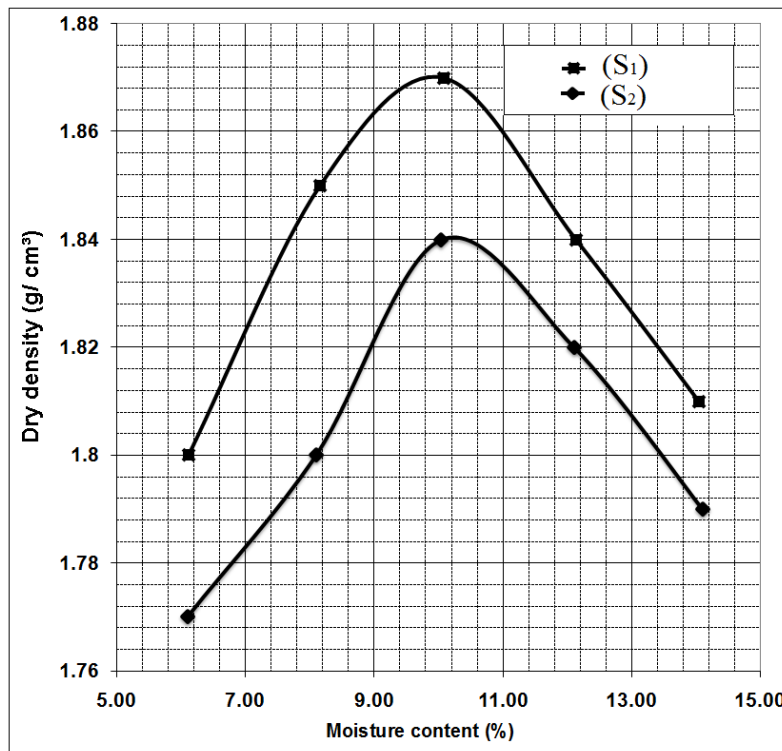


Figure IV.7. Courbes Proctor des deux échantillons du lœss

En référence des travaux de Mtimet (1992) relatif au lœss Tunisien dont la valeur de la densité sèche est comprise entre 1.9 et 2 g/cm³, le lœss Algérien est moins dense. La même remarque peut être associée en tenant compte des données du lœss Mongolien dont la valeur de la densité sèche est égale à 1.93 g/cm³ (Rezaei et al. 2011). En revanche, la comparaison avec les résultats des travaux de Ștefan-Silvian (2014) relatif au lœss Iranien, donnant des valeurs comprises entre 1.7 et 1.9 g/cm³, révèle le caractère de comparabilité avec le lœss Algérien. D'une manière générale, la densité sèche dépend la composition du lœss en calcite et de la qualité et la quantité d'argile (Bell 1992).

IV.3.14 Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande

L'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande consiste à déterminer les caractéristiques mécaniques des sols qui sont la cohésion et l'angle de frottement interne. L'essai s'effectue sur une éprouvette du sol, placée dans une boîte de cisaillement, constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Les demi-boîtes se déplacent horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte normale déterminée. La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à une vitesse constante. La force totale de cisaillement est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure. Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon. L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel s'exerce une contrainte normale déterminée.

L'essai effectué sur les échantillons est de type non consolidé non drainé (UU). Cet essai à fait l'objet de la norme française (NF P94-071). Une boîte de cisaillement cylindrique de (60 × 60 × 20 mm) est utilisée. Les éprouvettes sont préparées et compactées à leur teneur en eau optimale et densité sèche maximale de l'essai Proctor. Ils ont placé entre deux demi-boîtes pouvant glisser horizontalement, avec un taux de cisaillement de 1.25 mm/min.

L'essai consiste à appliquer sur l'éprouvette une force normale constante "N". Un piston exerce une force de cisaillement horizontal "T". L'essai est effectué en imposant un déplacement relatif des deux demi-boîtes. Le test est réalisé en imposant un déplacement relatif des demi-boîtes. Un dispositif mécanique approprié entraîne le châssis inférieur à une vitesse constante et la force de cisaillement sur le châssis supérieur est mesurée par le capteur de force. Au cours de l'essai, l'effort normal N (Capteur force), l'effort horizontal de cisaillement T (Capteur force), le déplacement horizontal du châssis mobile (capteur déplacement) et le déplacement vertical du piston dans le châssis supérieur (capteur déplacement) ont été mesurés et enregistrés. À la fin de l'essai, les données recueillies par l'unité d'acquisition sont traitées par le logiciel approprié. Les résultats ont été ensuite générés, présentant les différents détails de l'essai sous forme de tableaux et de courbes (contraintes-déformations et droites intrinsèques).

Présentations des résultats

Les lectures données par le capteur de mesure de l'effort T sont données dans les tableaux (IV.25) et (IV.26).

Tableau IV.25. Lectures de capteur de mesure de l'effort T de l'échantillon (S₁)

Déplacement (mm)	L'effort de cisaillement T (Kgf)		
	Contrainte normale		
	1 bars	2 bars	3 bars
0.2	45	65	65
0.4	87	95	111
0.6	125	135	153
0.8	153	175	193
1	173	212	300
1.2	203	243	340
1.4	222	270	412
1.6	230	296	445
1.8	238	318	466
2	243	340	518
2.5	243	372	558
3	243	400	620
3.5	237	422	653
4	227	437	689
4.5	224	445	709
5	217	450	739
5.5		446	758
6		432	762
6.5		418	769
7		408	760
7.5			740
8			730

Tableau IV.26. Lectures de capteur de mesure de l'effort T de l'échantillon (S₂)

Déplacement (mm)	L'effort de cisaillement T (Kgf)		
	Contrainte normale		
	1 bars	2 bars	3 bars
0.2	40	65	76
0.4	57	125	142
0.6	76	167	201
0.8	93	204	254
1	112	232	296
1.2	130	266	331
1.4	144	293	362
1.6	158	318	387
1.8	174	339	407
2	186	364	431
2.5	212	418	479
3	228	455	526
3.5	244	488	566
4	258	520	592
4.5	273	536	634

5	284	549	658
5.5	287	562	679
6	290	574	698
6.5	291	581	722
7	289	586	748
7.5	289	583	769
8	284	570	759
8.5	282	558	738

Le calcul de différents paramètres mesurés a donné dans les Tableaux (IV.27) et (IV.28).

Tableau IV.27. Calcul de la contrainte de cisaillement de l'échantillon (S₁)

	Contrainte normale (bars)		
	1	2	3
L'effort de cisaillement T (Kgf)	243	450	769
Déplacement (mm)	3	5	6.5
Section S _c (cm ²)	19.73	18.47	22.98
Force (Kgf)	18.95	35.1	59.98
Contrainte de cisaillement (bars)	0.96	1.90	2.61

Tableau IV.28. Calcul de la contrainte de cisaillement de l'échantillon (S₂)

	Contrainte normale (bars)		
	1	2	3
L'effort de cisaillement T (Kgf)	291	586	769
Déplacement (mm)	6.5	7	7.5
Section S _c (cm ²)	24.39	24.05	23.99
Force (Kgf)	22.69	45.70	59.98
Contrainte de cisaillement (bars)	0.93	1.90	2.50

Avec :

Force de cisaillement (F) = T x K, K : coefficient de l'anneau = 0.078

Contrainte de cisaillement (τ) = $\frac{F}{S_c}$ (bars)

Pour les deux échantillons du loess (S₁) et (S₂), les courbes de l'effort de cisaillement en fonction du déplacement de l'essai de cisaillement direct sont présentées, respectivement, dans les figures (IV.8) et (IV.9). Les courbes intrinsèques correspondantes sont données dans la figure (IV.10).

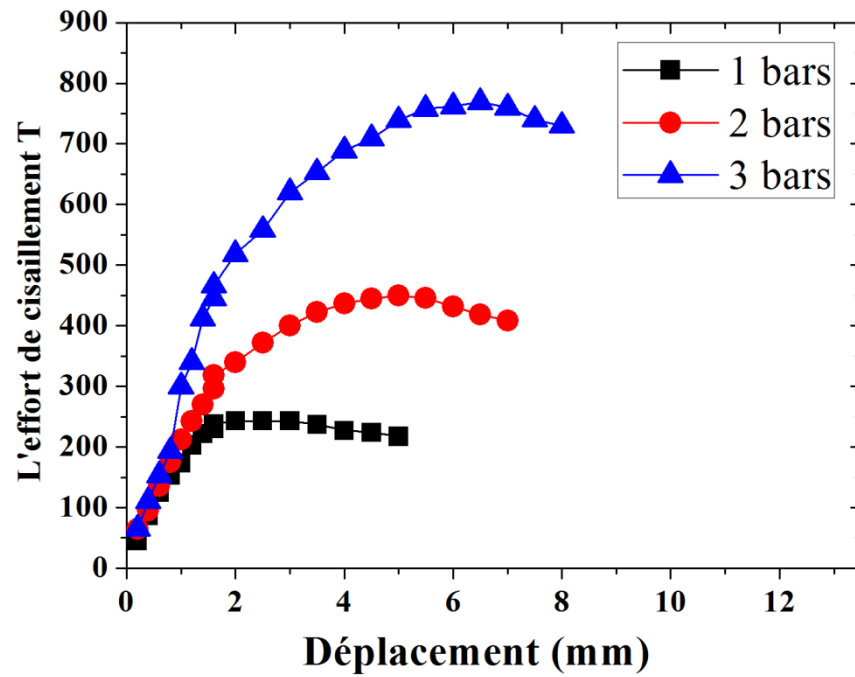


Figure IV.8. Courbes effort de cisaillement/déplacement de l'échantillon (S_1)

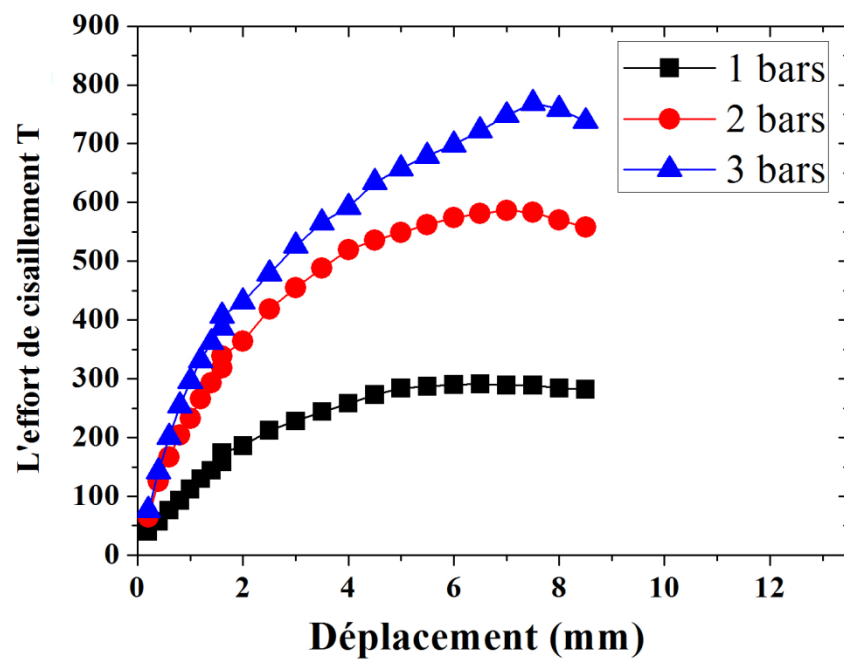


Figure IV.9. Courbes effort de cisaillement/déplacement de l'échantillon (S_2)

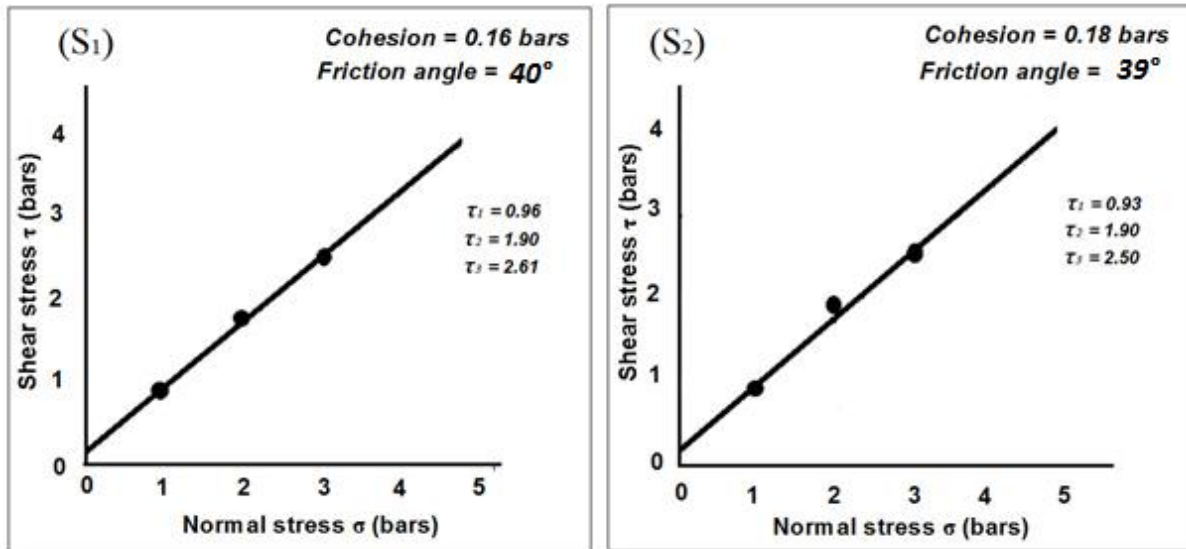


Figure IV.10. Courbes intrinsèques des deux échantillons du loess

Interprétation des résultats

Pour les deux échantillons, les résultats indiquent une faible cohésion. Elle est de l'ordre de 0.16 bars pour l'échantillon (S₁) et 0.18 bars pour l'échantillon (S₂). Les angles de frottement sont respectivement 40° et 39°.

En se rapportant à certains travaux de recherche publiés sur le loess, les angles de frottement interne sont pour la plupart des cas sont comprise entre 25 et 35° (Anagnosti 1973 ; Assallay 1998). Aussi, Erol et El-Ruwaih (1982) ont indiqué que la valeur de l'angle de frottement au cisaillement du loess désertique est comprise entre 24 et 26.5°. La cohésion c correspondante est de l'ordre de 0.1 à 0.46 bars. Pour le loess Tunisien, Mtimet a montré que la valeur de l'angle de frottement est comprise entre 29 et 36°. Les valeurs de la cohésion correspondantes sont nulles (Mtimet 1992). Ces études indiquent que la cohésion dépend de la teneur en eau, la teneur en argile, et de la densité sèche.

IV.4 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre ont permis de déterminer et caractériser les propriétés physico-chimiques des échantillons du loess étudiés. Les principales conclusions se résument comme suit :

Les caractéristiques granulométriques du loess Algérien et Tunisien sont très proches. Ils se composent principalement de sable fin. Ce constat confirme les thèses de Coude-Gaussen (1987) qui indique que le loess de l'Afrique du Nord est sableux.

- Les résultats du pH et de la conductivité électrique indiquent que le lœss Algérien est un matériau basique. Il est classé parmi les sols très salés.
- La composition chimique du lœss Algérien est surtout siliceuse. Un aspect de similarité est observé avec le lœss Tunisien.
- Les résultats de calcimétrie indiquent la présence d'une quantité notable des grains de carbonate de calcium. Les valeurs de VBS et d'équivalent de sable montrent que le lœss Algérien est classé parmi les sols limoneux peu plastiques.
- L'analyse minéralogique (DRX) relève que le lœss (S₁) est composé de minéraux argileux de type montmorillonite et Halloysite. L'échantillon (S₂) se caractérise par la présence de kaolinite et montmorillonite.
- Les données de l'analyse minéralogique sont en cohérentes avec les résultats des analyses chimiques.
- Les propriétés de plasticités obtenues sont similaires à ceux du lœss de nombreuses régions du monde. Basé sur les caractéristiques de plasticité définies par Gibbs et Holland (1960), le lœss Algérien est classé en deux types : un lœss sableux pour l'échantillon (S₁), et limoneux pour l'échantillon (S₂). Le lœss Algérien présente un indice de plasticité inférieur à 10 %.
- Les valeurs de la cohésion obtenues par l'essai de cisaillement direct sont relativement faibles. Elles restent inférieures à 50 Kpa. En effet, le lœss Algérien développe des angles de frottement internes importants. À l'optimum Proctor modifié, la densité sèche maximale du lœss Algérien est comparativement similaire à celles de plusieurs régions du monde.

Chapitre V

Caractérisation rhéologique
des suspensions du lœss étudié

V.1 Introduction

On présente dans ce chapitre les résultats expérimentaux des essais rhéologiques pratiqués sur des échantillons de suspensions du lœss à différentes concentrations massiques. L'étude du comportement rhéologique des suspensions est réalisée à travers l'examen de l'écoulement en fonction de la concentration, la variation de la viscosité et la thixotropie. Cette dernière est examinée à travers la réalisation des boucles d'hystérésis.

V.2 Matériels et méthodes

V.2.1 Moyens expérimentaux

Les mesures rhéologiques des suspensions du lœss sont réalisées, au laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICube) -MécaFlu- mécanique des fluides (Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, France), à l'aide d'un rhéomètre à contrainte imposée (AR 2000, TA Instrument) (Figure V.1). L'appareil qui dispose d'un système Peltier pour le contrôle de température, est équipé d'une géométrie cône-plan (diamètre 60 mm, 2° d'angle).

Un papier verre rugueux placé sur la géométrie de mesure permet de limiter le glissement pendant la mesure. Les effets d'évaporation dus aux changements éventuels de la composition des suspensions sont contrôlés par une enceinte anti-évaporation qui abrite le dispositif de mesure.



Figure V.1. Le rhéomètre AR 2000 (TA Instrument) utilisé

V.2.2 Choix de la géométrie de mesure

Le choix de la géométrie de mesure, est effectué en fonction de la nature du matériau étudié et les propriétés rhéologiques mesurés (Bird et al. 1987 ; Jarny 2004 ; Benbelkacem 2009 ; Ben Azouz-Ahmed 2010 ; Benslimane 2012). Pour notre cas, le choix s'est fixé pour la géométrie de type cône-plan (diamètre 60 mm, 2° d'angle et entrefer à la troncature : 500 μm). En effet, cette géométrie offre l'avantage de garantir une vitesse de cisaillement homogène dans l'intervalle de mesure (Paumier 2007 ; Fall 2008). La taille de l'entrefer de la géométrie cône-plan doit être au minimum cinq à dix fois plus grande que la taille maximale des particules (Benbelkacem 2009 ; Ben Azzouz 2010). La taille maximale des particules des suspensions expérimentées est de 100 μm .

V.2.3 Protocole de préparation des échantillons

Pour les essais du comportement, les échantillons sont préparés suivant le protocole indiqué. Ainsi et afin de le déshydrater, l'échantillon est préparé sous forme de poudre et placé à 40 °C dans une étuve pendant 24 h. Dans le but d'une préparation compatible avec la géométrie de mesure rhéologique utilisée, une opération de tri granulométrique est réalisée. Cette opération de tri est effectuée après avoir passé l'échantillon au tamis 100 μm .

Plusieurs concentrations massiques des suspensions du lœss sont préparées (30 %, 40 %, 45 %, 50 % et 55 %). Le choix des concentrations extrêmes, est imposé par le fait qu'au-dessous de 30 %, la suspension (lœss-eau) présente un comportement Newtonien. En revanche, au-delà de 55 %, le mélange devient une pâte. Afin de suivre l'évolution des paramètres rhéologiques en fonction de la concentration, le pas des valeurs de concentration est ajusté.

Pour éviter la formation d'agréats, le protocole de préparation des suspensions indique dans l'étape près-mesure, de disperser sous agitation mécanique continue, la poudre du lœss dans la quantité requise d'eau distillée (voir tableau V.1). A titre d'exemple, on note que pour obtenir une suspension à la concentration massique (30 %), 70 g d'eau sont ajoutés dans un bêcher de 200 mL et agitée vigoureusement à 500 tr/min. Ensuite, on ajoute progressivement 30 g de la poudre du lœss. Pour assurer une bonne homogénéisation, la suspension obtenue est soumise à une agitation mécanique continue à 500 tr/min pendant 24 h.

Tableau V.1. Concentrations massiques des suspensions du loess étudié

Masse de loess (g)	Masse de l'eau (g)	Concentration massique $C_m = \frac{M_{\text{loess}}}{M_{\text{total}}} \times 100 (\%)$
30	70	30
40	60	40
45	55	45
50	50	50
55	45	55

V.2.4 Protocole de mesure rhéologique

Les mesures rhéologiques sont effectuées sur plusieurs concentrations massiques. Après la mise en place de l'échantillon sur la géométrie de mesure, un pré-cisaillement de vitesse de 500 s^{-1} est appliqué pendant 1 min, suivi d'une période de repos de 2 min. Cette période de repos correspond au temps minimal de la déstructuration des suspensions et elle permet au fluide de retrouver sa structure initiale et atteindre l'équilibre.

Les courbes d'écoulement sont obtenues en appliquant des rampes de montées linéaires avec un taux de contrainte constant de $0.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$. Durant tous les essais, la température est maintenue constante à $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les essais de thixotropie sont effectués sur les suspensions de mélange (loess+eau) pour une concentration massique de 30 %. Cette concentration est choisie parce qu'elle permet d'exhiber le comportement thixotropique et répond aux conditions optimales de l'utilisation des moyens expérimentaux. Comme pour les essais de comportement en écoulement, un pré-cisaillement de 500 s^{-1} est effectué durant 2 min, suivi d'une période de repos de 2 min.

Les essais de la thixotropie consistent à appliquer une contrainte avec une rampe montante, suivis d'un palier et enfin une descente. Le taux de contrainte de la rampe montante est de $0.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$. Ce taux permet de suivre l'évolution de comportement. Lorsque le gradient de cisaillement maximal est atteint (aux alentours 1300 s^{-1}), on passe à l'étape suivante (contrainte de palier). Le cisaillement à l'étape de palier est maintenu durant 180 s, en appliquant une contrainte de cisaillement constante. Afin d'obtenir un rhéogramme correspondant à l'état déstructuré, l'étape suivante consiste à effectuer une descente de 180 s. Ce protocole de mesure est particulièrement adapté pour mettre en évidence la thixotropie des suspensions.

V.3 Résultats et discussion

V.3.1 Reproductibilité des résultats

Pour tester la reproductibilité de mesures, des essais préliminaires sont effectués avec un décalage d'un 24 h. pour chaque prélèvement d'un échantillon du lœss lequel l'agitation magnétique est maintenue constante. Les figures (V.2, V.3, V.4 et V.5) montrent des exemples des résultats obtenus pour deux échantillons de la même suspension ($C_m = 30\%$ et $C_m = 55\%$).

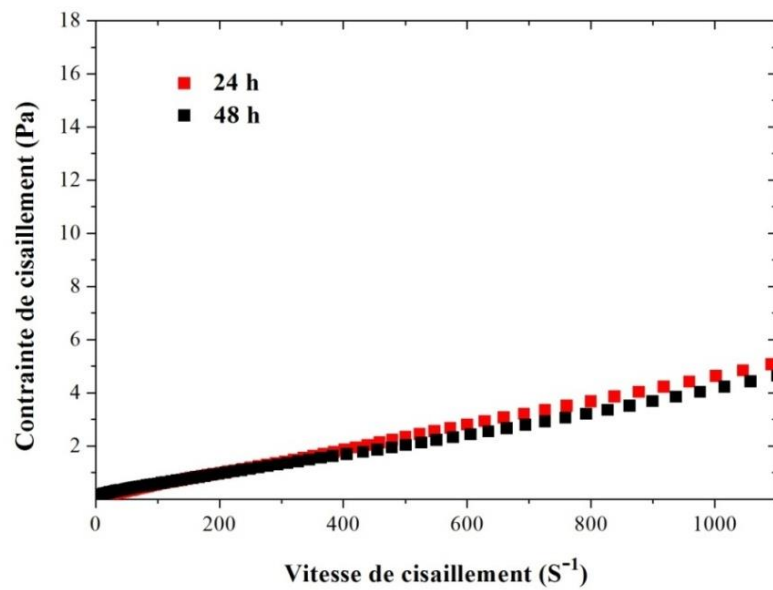


Figure V.2. Courbe d'écoulement de la suspension S_1 ($C_m = 30\%$) sur deux prélèvements différents (24 et 48 heures)

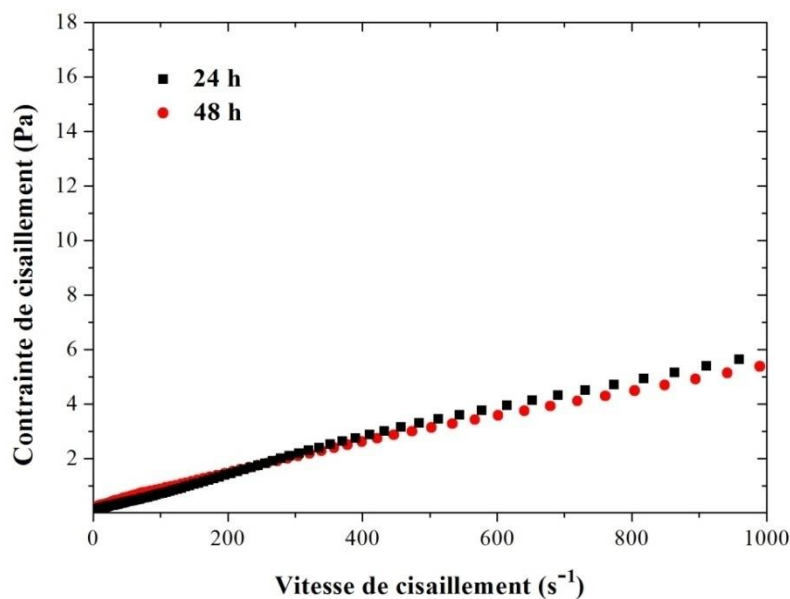


Figure V.3. Courbe d'écoulement de la suspension S_2 ($C_m = 30\%$) sur deux prélèvements différents (24 et 48 heures)

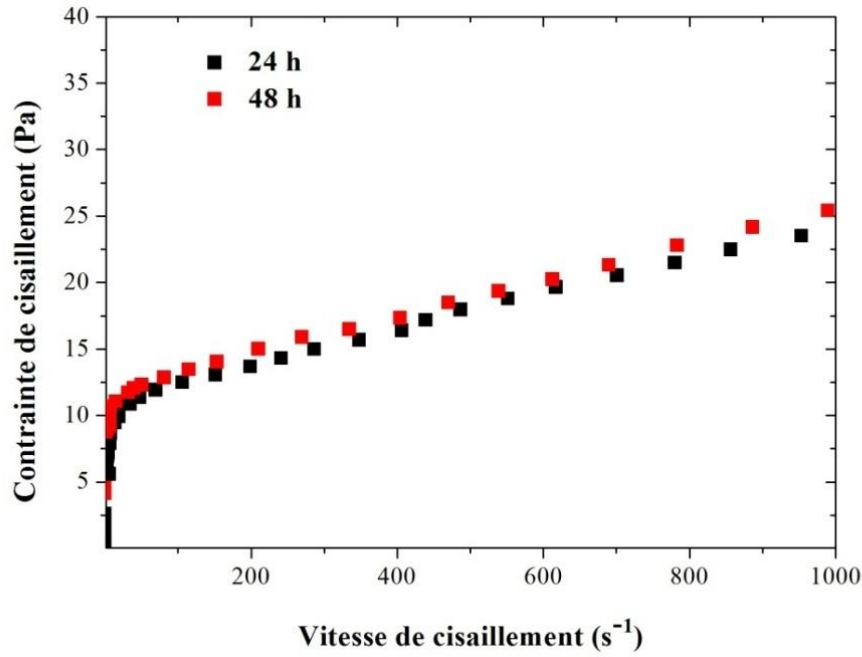


Figure V.4. Courbe d'écoulement de la suspension S_1 ($C_m = 55\%$) sur deux prélèvements différents (24 et 48 heures)

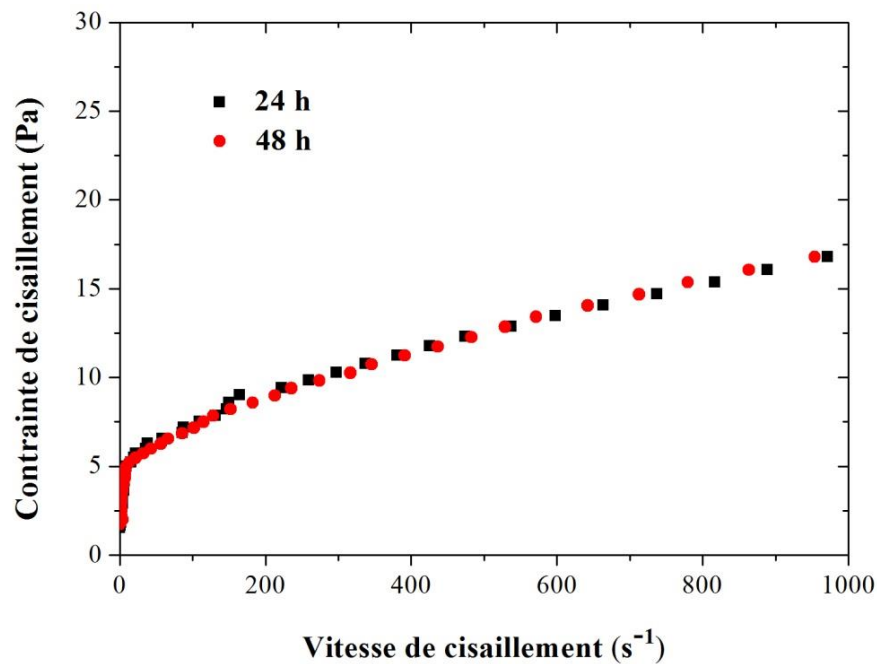


Figure V.5. Courbe d'écoulement de la suspension S_2 ($C_m = 55\%$) sur deux prélèvements différents (24 et 48 heures)

La bonne superposition des courbes est la signature d'une bonne reproductibilité des mesures sur différents prélèvements dans les conditions expérimentales fixées.

V.3.2 Comportement rhéologique des suspensions du lœss

L'étude du comportement rhéologique des deux suspensions du lœss (S_1) et (S_2) est réalisée à travers l'examen de l'écoulement en fonction de la concentration, la variation de la viscosité, et la thixotropie.

V.3.2.1 Mesures en écoulement des suspensions du lœss à différentes concentrations

Pour étudier l'influence de la concentration massique sur l'écoulement du lœss, cinq concentrations sont considérées. Pour les différentes concentrations explorées (30 %, 40 %, 45 %, 50 %, et 55 %), les figures (V.6) et (V.7), présentent respectivement l'évolution de la contrainte de cisaillement, en fonction de la vitesse de cisaillement, des deux suspensions du lœss (S_1) et (S_2)

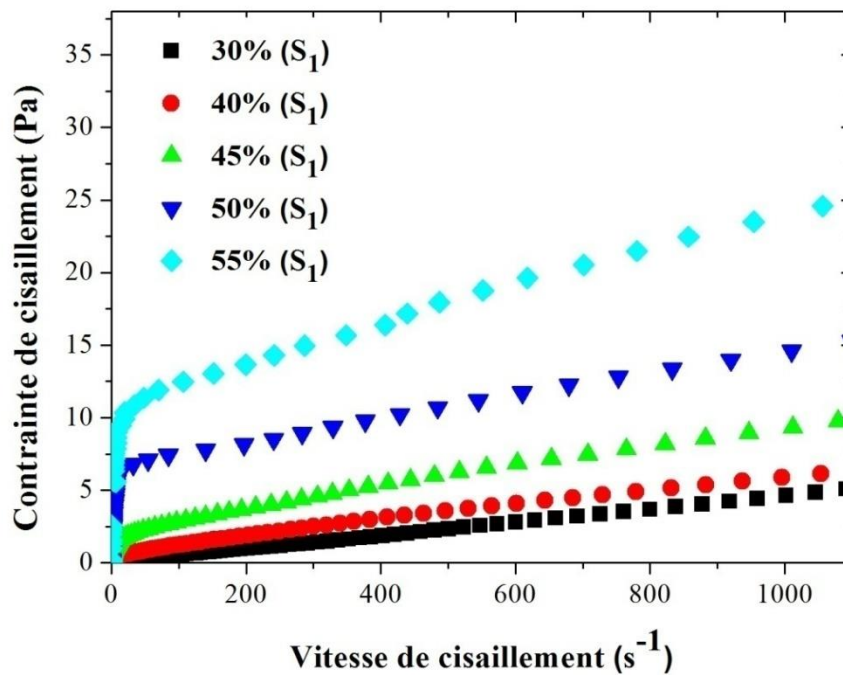


Figure V.6. Courbes d'écoulement de l'échantillon (S_1) en fonction des concentrations massiques

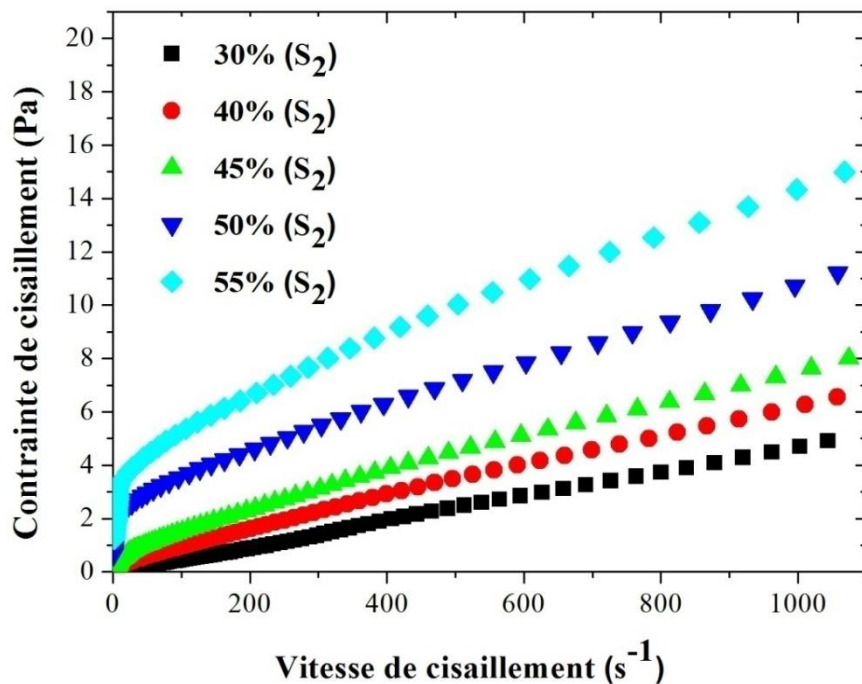


Figure V.7. Courbes d'écoulement de l'échantillon (S_2) en fonction de la concentration massique

Les résultats indiquent qu'à partir de la concentration 40 %, les valeurs de la contrainte seuil sont non nulles. Ce qui signifie que le comportement est non newtonien. Pour prédire la sensibilité et la réponse du sol aux perturbations externes, le choix d'un modèle capable de décrire les caractéristiques contrainte-déformation-résistance est important (Li 2015). En effet, les modèles de Bingham, d'Ostwald et d'Herschel-Buckley sont expérimentés. Des essais de comparaison entre les différents modèles confirment les performances du modèle d'Herschel-Buckley ($\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$). Ce modèle se distingue par sa simplicité et s'avère efficace dans son ajustement avec la représentation des résultats expérimentaux. Il reproduit convenablement le comportement rhéologique des deux échantillons. Plusieurs chercheurs ont également rapporté que les suspensions d'argile sont mieux décrites par la loi de Herschel-Bulkley (Malfoy et al. 2003 ; Kelessidis & Maglione 2008 ; Maciel et al. 2009 ; Benyounes et al. 2010). Maciel et al. (2009) rapportent que l'utilisation du modèle d'Herschel-Bulkley s'adapte aux larges plages de valeurs de taux de cisaillement, y compris les petites valeurs. Les valeurs des contraintes seuils estimées se trouvent proche aux valeurs réelles avec une incertitude suffisamment petite. Toutefois, d'autres études antérieures ont indiqué que la suspension du lœss peut être représentée par le modèle de Bingham (Szegi 2004 ; 2006).

Pour les suspensions des deux échantillons du lœss, les résultats présentés dans les figures (V.5) et (V.6) indiquent que la contrainte de cisaillement augmente en fonction de la concentration du lœss. Elle est plus importante pour l'échantillon (S_1) que celui du (S_2). Ceci s'explique par le fait que la plasticité de l'échantillon (S_1) est relativement plus importante que celle de l'échantillon (S_2).

V.3.2.2 L'évolution de la viscosité des suspensions du lœss en fonction de la concentration massique

Les figures (V.8) et (V.9) montrent respectivement l'évolution de la viscosité des deux suspensions (S_1) et (S_2) en fonction de la concentration massique.

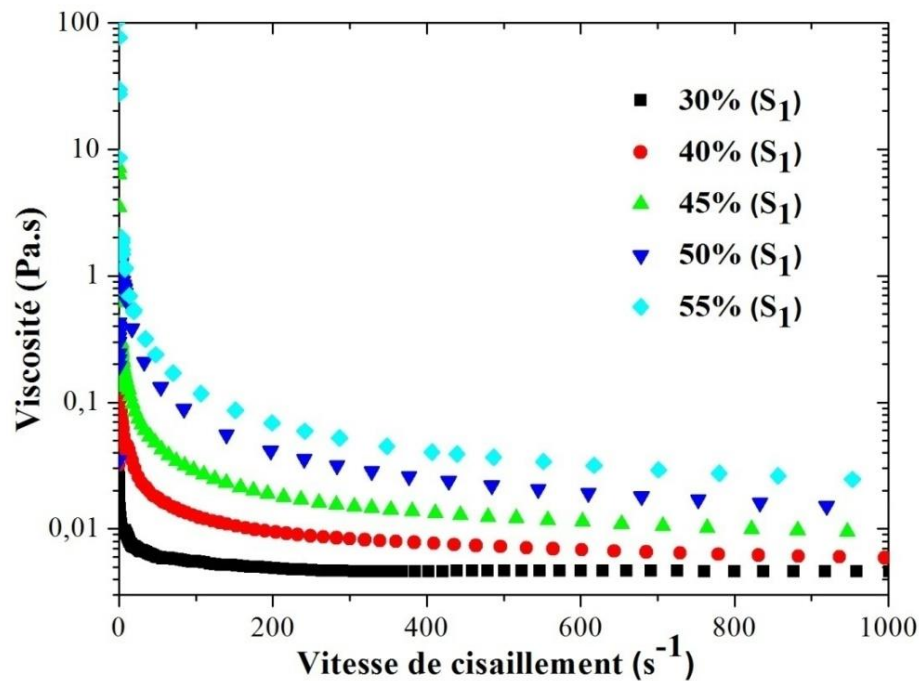


Figure V.8. L'évolution de la viscosité de l'échantillon (S_1) en fonction de la concentration massique

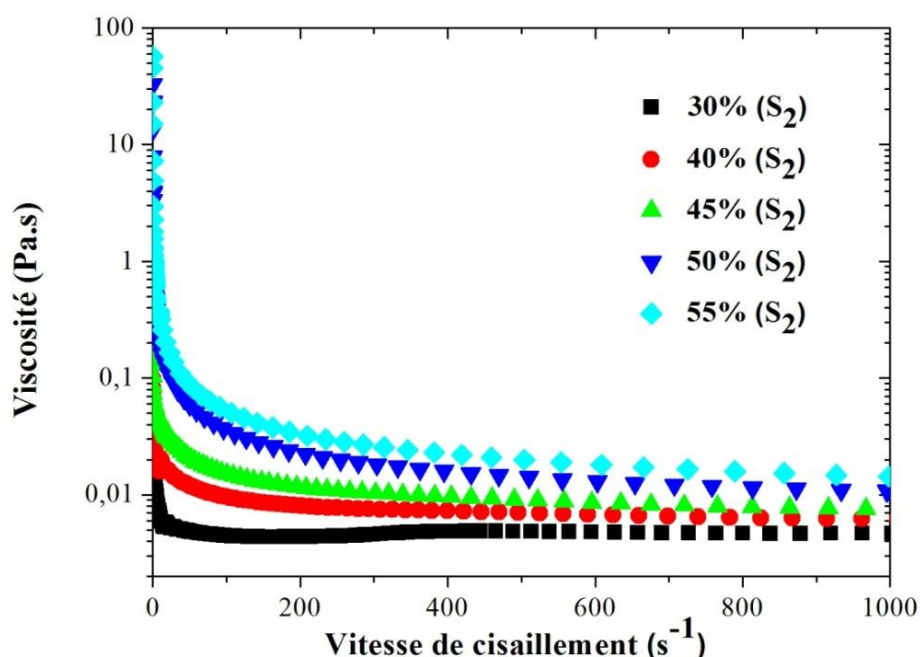


Figure V.9. L'évolution de la viscosité de l'échantillon (S_2) en fonction de la concentration massique

Les résultats indiquent que la viscosité diminue en fonction de la vitesse de cisaillement. On déduit des figures, que pour des taux de cisaillement élevés, les suspensions deviennent plus fluides. Les deux échantillons présentent donc un caractère rhéofluidifiant. Ce caractère confirme que le cisaillement contribue à la destruction initiale de la structure de la suspension. Le caractère rhéofluidifiant est dû à l'alignement des chaînes des particules de la structure du matériau dans la direction de l'écoulement ou éventuellement leur réorganisation sous l'effet du cisaillement (Barnes et al. 1989). Les auteurs notent également que le phénomène est lié à la concentration en particules, la taille et la forme des particules solides dans la suspension. L'évolution de la viscosité des deux suspensions en fonction de la concentration massique est présentée dans les figures (V.10) et (V.11). Pour plusieurs gradients de vitesse de cisaillement et différentes concentrations massiques, les valeurs de viscosités sont enregistrées.

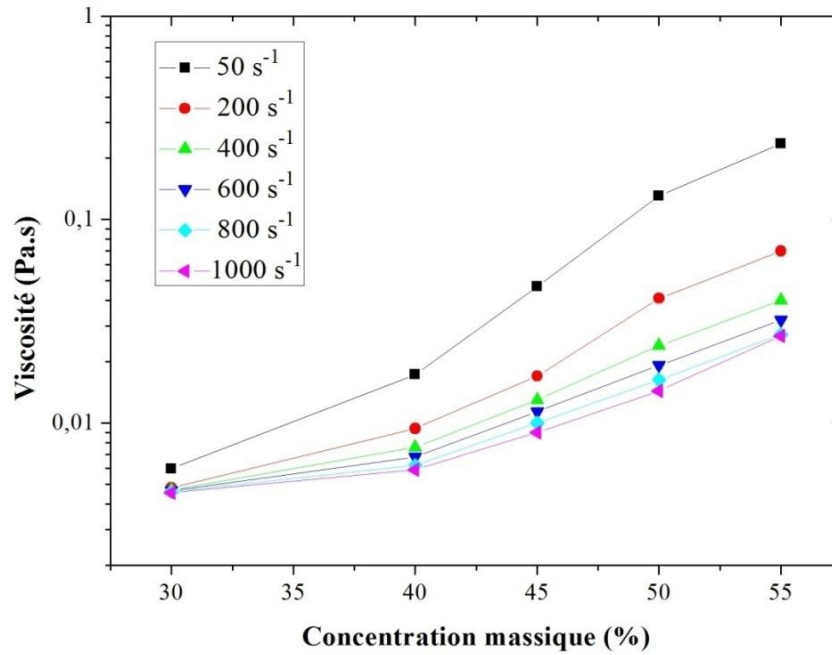


Figure V.10. Variation de la viscosité de la suspension du lœss (S₁) en fonction de la concentration pour différents vitesses de cisaillement

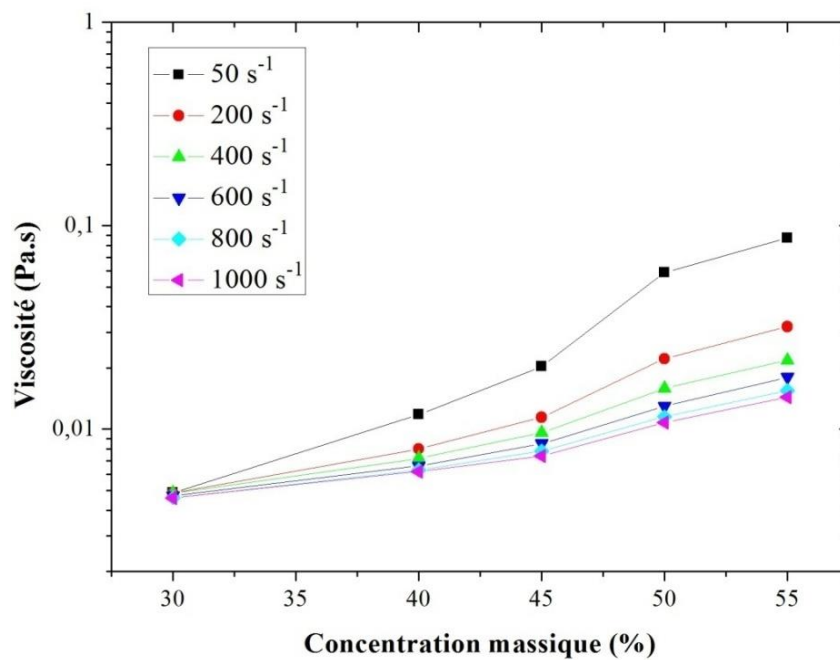


Figure V.11. Variation de la viscosité de la suspension du lœss (S₂) en fonction de la concentration pour différents vitesses de cisaillement

Les figures montrent que la pente de la viscosité croît avec la concentration. Pour les petites valeurs des concentrations, les valeurs de la viscosité sont faibles. Les particules se trouvent ainsi organiser en agrégats, susceptibles de se déformer ou de s'orienter sous l'effet des forces

hydrodynamiques. Par ailleurs, la formation des floccs sous forme des chaines conduit aussi à une augmentation de la viscosité (Barnes et al. 1989 ; Maurya et Mandal 2016).

V.3.2.3 L'évolution des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concentration massique

Pour évaluer la réponse au cisaillement des suspensions du lœss expérimenté, l'évolution des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley (contrainte seuil, consistance, et l'indice d'écoulement) est examiné en fonction de différentes concentrations. Pour les deux suspensions, les valeurs des paramètres enregistrés sont groupées dans les tableaux (V.2) et (V.3).

Tableau V.2. Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley pour différentes concentrations de la suspension (S₁)

Concentration (%)	Contrainte seuil τ_0 (Pa)	Consistance K (Pa. s ⁿ)	Indice d'écoulement n (-)	r ²
30	0.07765	0.00393	1.021	0.999
40	0.7634	0.00521	0.8681	0.998
45	1.245	0.02379	0.8251	0.998
50	5.845	0.03542	0.797	0.994
55	9.558	0.07225	0.7666	0.994

Tableau V.3. Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley pour différentes concentrations de la suspension (S₂)

Concentration (%)	Contrainte seuil τ_0 (Pa)	Consistance K (Pa. s ⁿ)	Indice d'écoulement n (-)	r ²
30	0.00618	0.00413	1.02	0.999
40	0.1075	0.01529	0.8681	0.999
45	0.3008	0.03071	0.7916	0.999
50	2.016	0.03855	0.7864	0.996
55	3.038	0.07809	0.7215	0.996

Pour la suspension du lœss (S₁), les figures (V.12), (V.13) et (V.14) montrent respectivement l'évolution, à différentes concentrations massiques, de la contrainte seuil, la consistance et l'indice d'écoulement. Les figures (V.15), (V.16) et (V.17) représentent l'évolution des mêmes paramètres pour la suspension (S₂).

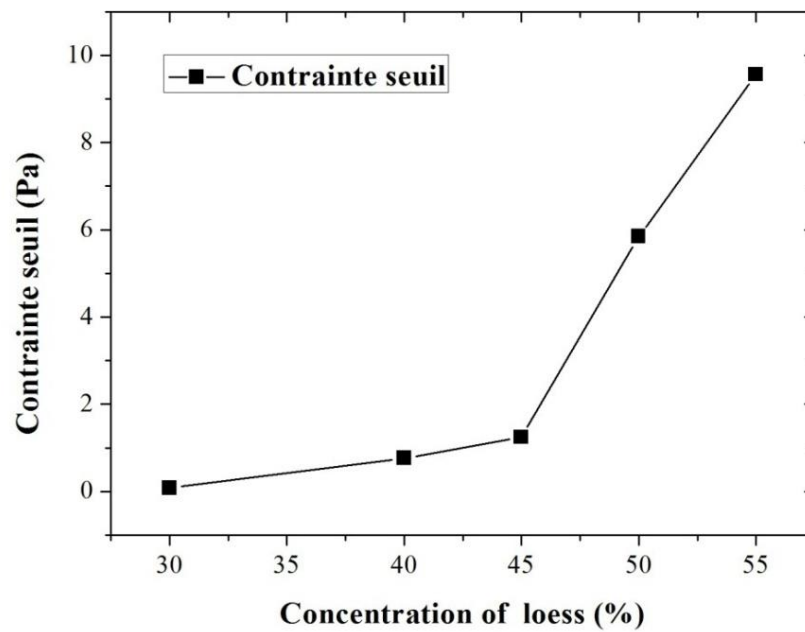


Figure V.12. Variation de la contrainte seuil d'écoulement de la suspension (S_1) en fonction de la concentration massique

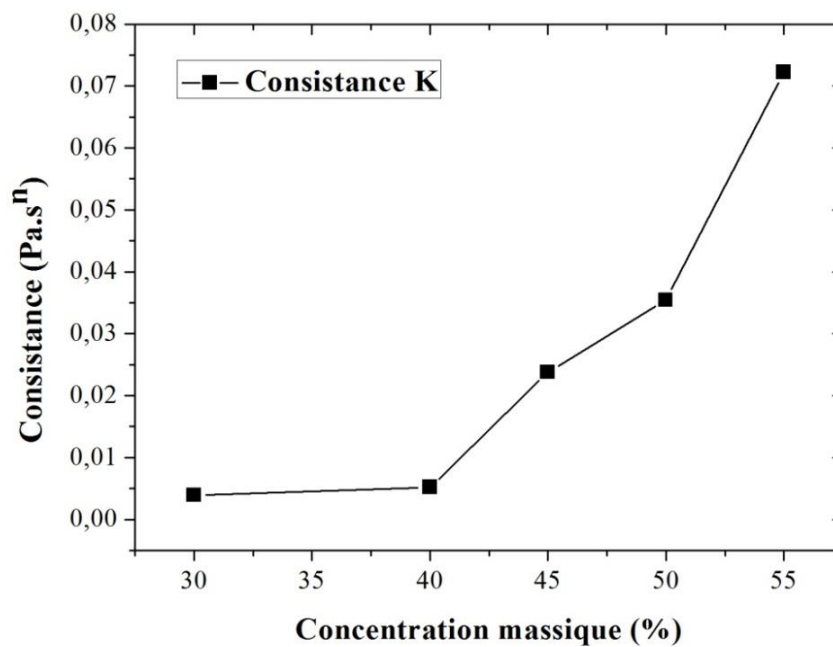


Figure V.13. Variation de l'indice de consistance de la suspension (S_1) en fonction de la concentration massique

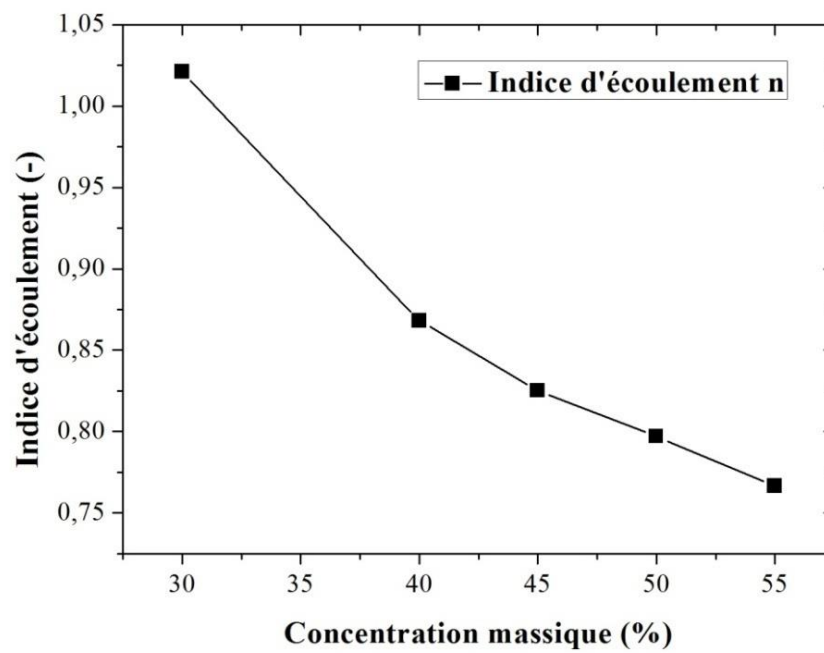


Figure V.14. Variation de l'indice d'écoulement de suspension (S_1) en fonction de la concentration massique

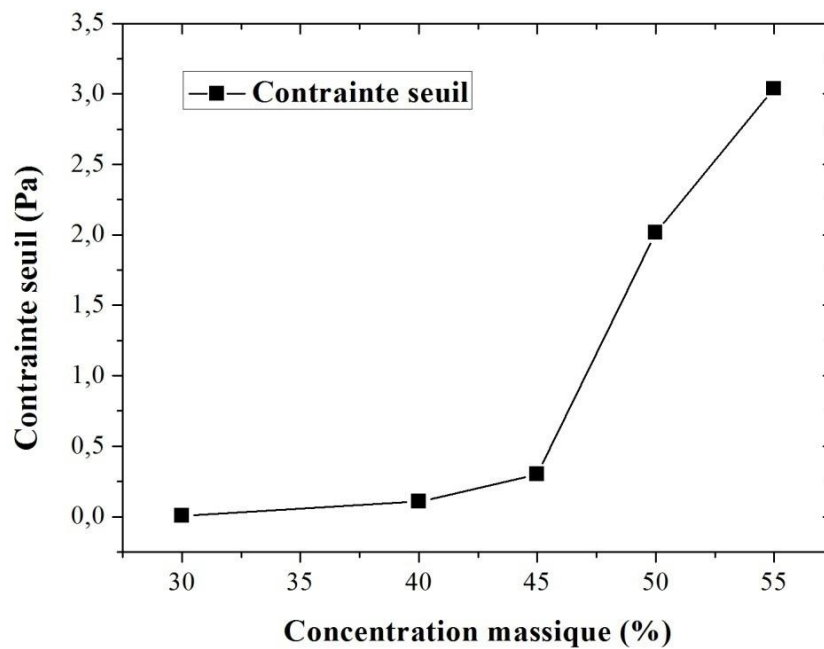


Figure V.15. Variation de la contrainte seuil d'écoulement de la suspension (S_2) en fonction de la concentration massique

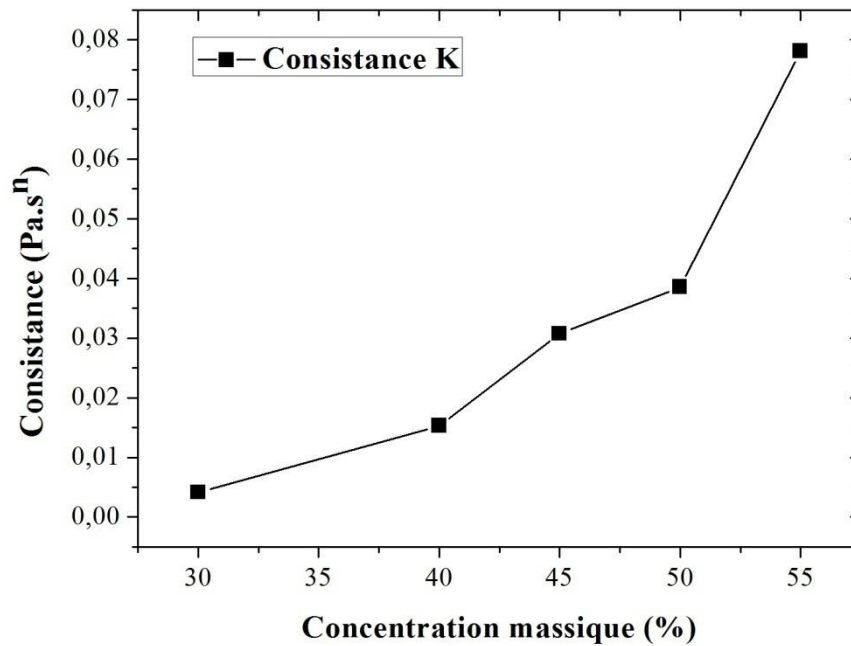


Figure V.16. Variation de la consistance de suspension (S_2) en fonction de la concentration massique

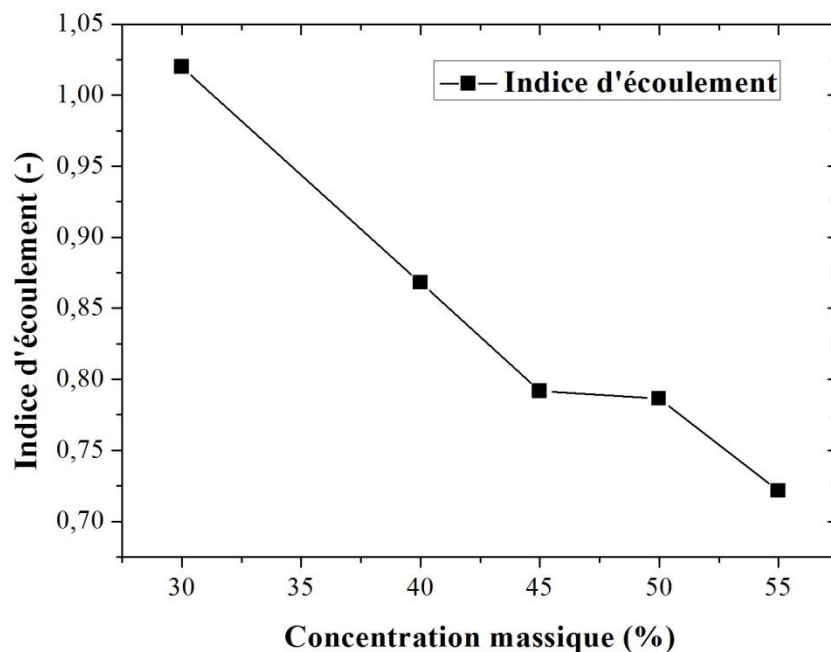


Figure V.17. Variation de l'indice d'écoulement de suspension (S_2) en fonction de la concentration massique

D'après l'ensemble des figures, il ressort que le seuil d'écoulement et l'indice de consistance augmentent rapidement avec la concentration. Par contre, la valeur de l'indice d'écoulement se trouve diminuée. Les résultats confirment l'effet de la concentration des particules solides

sur l'écoulement. Benedini and Margaritora (1974) ont montré que l'écoulement des suspensions devient plus complexe au fur et à mesure que la concentration du mélange augmente.

V.3.2.4 Thixotropie des suspensions du lœss

Les résultats des essais rhéologiques ont révélé que les lœss expérimentés ont un caractère thixotropique. Ce caractère se traduit par la génération des boucles d'hystérésis (Figures (V.18), (V.19)). Les figures correspondent aux résultats des essais de l'écoulement appliqués (Contrainte de cisaillement – Vitesse de cisaillement) sur des suspensions du lœss étudié à concentration (30 %). L'évaluation de la thixotropie est réalisée à travers l'examen des courbes d'hystérésis obtenues. Les hystérésis représentent une caractéristique fondamentale du phénomène de thixotropie (Feys et al. 2017). Elles résultent de la non-superposition des deux parties (montante et descendante) du rhéogramme (Contrainte de cisaillement – Vitesse de cisaillement). En effet, les gradients de cisaillement de la rampe montante sont inférieurs à ceux de la rampe descendante (Figures (V.18), (V.19)). Des travaux de recherche indiquent également que pour des matériaux argileux, les courbes montantes et descendantes ne se superposent pas et forment des boucles d'hystérésis (Wallevik 2009 ; Feys et al. 2017).

Feys et al. (2017) ont noté que la boucle d'hystérésis est un indicateur utile pour quantifier la thixotropie. Cet état de fait est confirmé par Baltazar et al. (2019). Ce dernier note que le degré de la thixotrope peut être déterminé à l'aide de l'aire de la boucle d'hystérésis. La grandeur de l'aire est liée à l'importance de la thixotropie qui devait être absente dans le cas de sa disparition (Costa et al. 2018). La quantification du degré de la thixotropie est exprimée en unité d'énergie par unité du volume (Ghannam et al. 2019).

L'examen des données des figures (V.20) et (V.21) indique notamment qu'à contrainte égale (palier de contrainte), la viscosité des suspensions diminue au cours du temps.

Lorsqu'une contrainte de cisaillement constante est appliquée sur un échantillon thixotrope, le taux de cisaillement augmente avec le temps. Ce qui induit une diminution de la viscosité (Callaghan et Ottewill 1974 ; Dullaert et Mewis 2005). Durant les étapes (montée et palier) et sous l'influence du cisaillement, la viscosité diminue. Cette diminution s'accélère d'avantage dans l'étape de la décharge rapide. Ce phénomène peut expliquer que sous l'influence de cisaillement (durant les étapes montée et palier), les liaisons inter-particules détruites n'ont plus le temps de se rétablir lors de la décharge rapide (Santos et al. 2017).

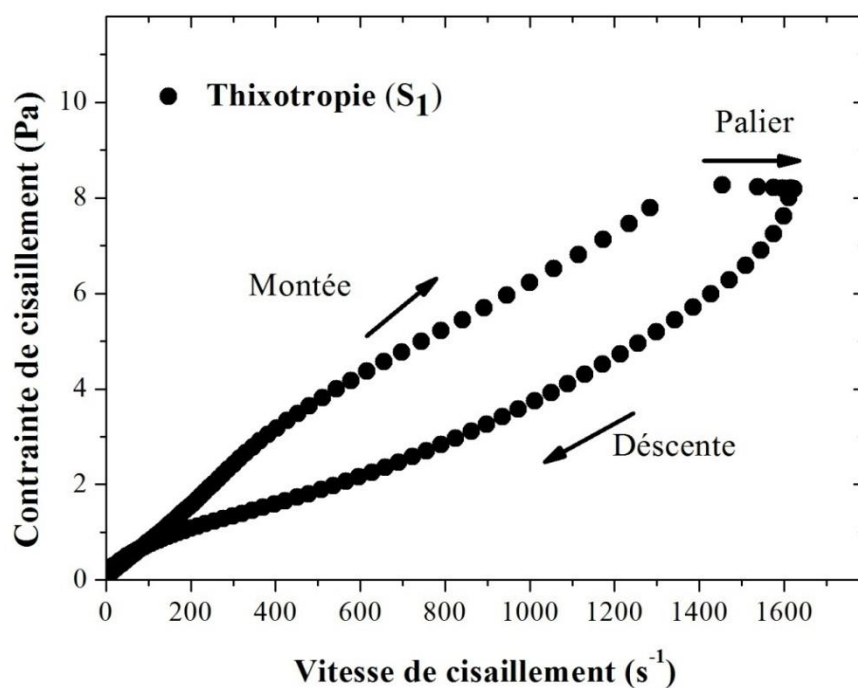


Figure V.18. Boucles d'hystérésis de la suspension du lœss (S₁)

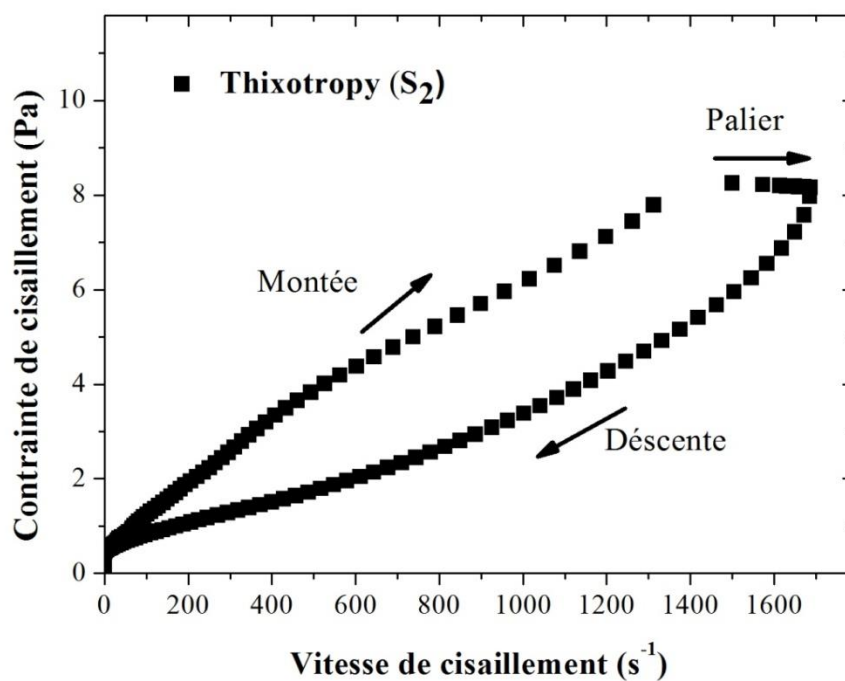


Figure V.19. Boucles d'hystérésis de la suspension du lœss (S₂)

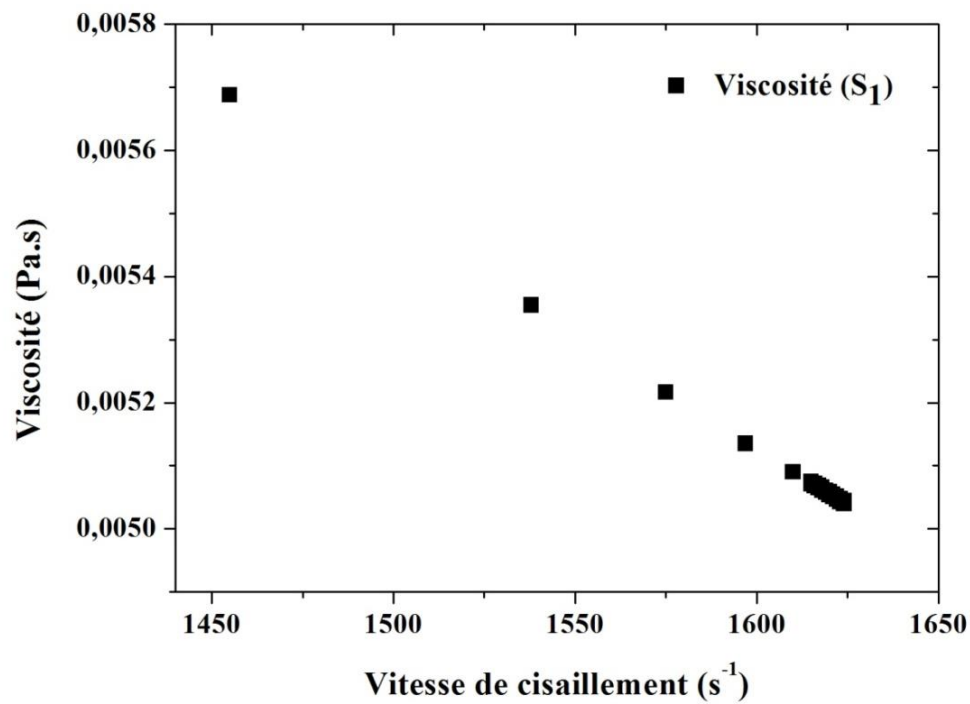


Figure V.20. L'évolution de viscosité de la suspension (S₁) (C_m=30%) à une contrainte de cisaillement constante correspondant à l'étape du palier

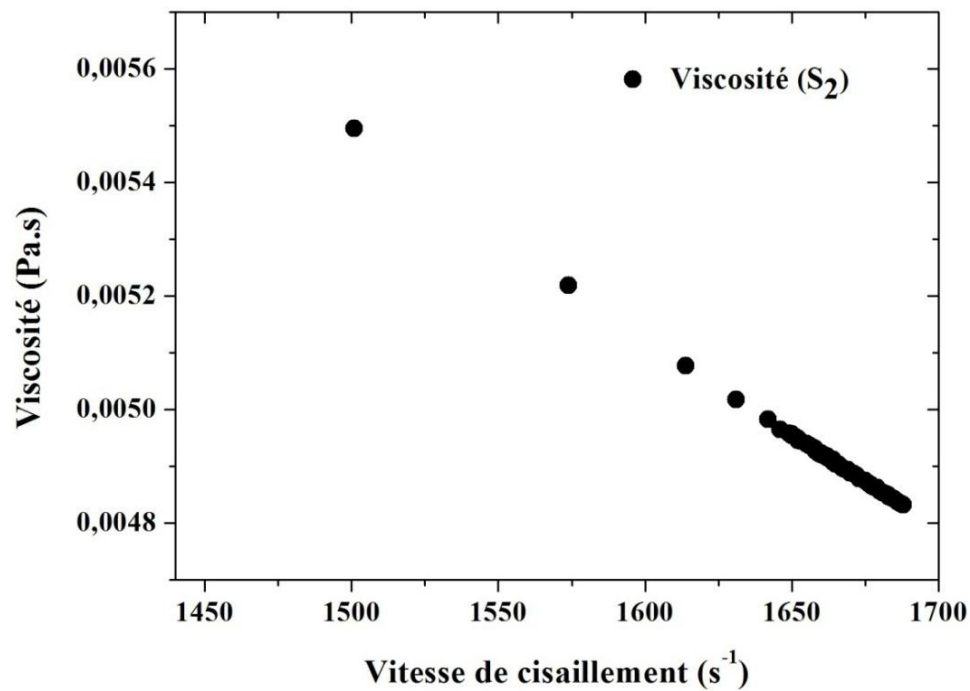


Figure V.21. L'évolution de viscosité de la suspension (S₂) (C_m=30%) à une contrainte de cisaillement constante correspondant à l'étape du palier

Le phénomène de la thixotropie se développe dans des systèmes structurés. Il donne lieu à des changements microstructuraux attribués à une rupture progressive suivie d'une réorganisation de la structure inter-particule (Markgraf 2006 ; Shanthilal et Bhattacharya 2016). Zhang et al. (2017) ont démontré que la thixotropie est un processus dans lequel la structure dispersée, sous l'influence de cisaillement, est transformée en une structure floculante. Durant le processus, les mouvements des particules donnent lieu à une homogénéisation de la distribution de la taille des pores de la structure du matériau. Ce phénomène est attribué aux changements dans l'interaction des forces attractives et répulsives inter-particulaires.

Le constat ainsi décrit est confirmé par des récents travaux. En effet, la thixotropie est expliquée comme un phénomène dû à la dégradation et la réorganisation de la structure du matériau examiné. La dégradation résulte de la rupture des floes et des liaisons inter-particulaires qu'il se forme. La réorganisation est observée lorsque la contrainte de cisaillement est supprimée. La microstructure du matériau se reconstruit de nouveau à travers la génération de nouvelles liaisons attractives inter-particulaires. L'état d'origine du matériau tente de se restaurer (Baltazar et al. 2019; Varchanis et al. 2019).

Plusieurs paramètres dont la composition minéralogique et la granulométrie influencent la thixotropie. Markgraf et al. (2012) ont constaté que la thixotropie est sensible à la composition minéralogique et chimique des sols. Zhang et al. (2014) ont indiqué également que la présence de minéraux argileux contribue à l'augmentation de la thixotropie.

V.4 Conclusion

L'étude de la rhéologie des suspensions du lœss, nous a permis de bien comprendre le système lœss-eau. L'analyse rhéologique a montré que les suspensions présentent un comportement non Newtonien. Pour les concentrations explorées, le modèle d'Herschel-Bulkley représente convenablement le comportement rhéologique. La viscosité des suspensions du lœss diminue en fonction de la vitesse de cisaillement. Pour des taux de cisaillement élevés, les suspensions deviennent plus fluides. En revanche, la viscosité augmente avec l'augmentation de la concentration du lœss. Les suspensions du lœss étudié se caractérisent également par un caractère rhéofluidifiant. Les boucles d'hystérésis confirment le caractère thixotrope du comportement rhéologique des suspensions du lœss Algérien. Les deux suspensions du lœss sont donc des fluides thixotropiques.

Chapitre VI

L'effet de l'ajout des additifs
sur les propriétés physico-
chimiques du lœss étudié

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'effet de l'addition de la bentonite et de la chaux sur les caractéristiques physico-chimiques des échantillons du loess de Ghardaïa est étudié. La sensibilité physique du matériau est explorée, à travers la distribution granulométrique et les propriétés de plasticité. En revanche, les modifications structurelles des échantillons sont examinées à travers des tests du pH et de conductivité électrique des mélanges.

VI.2 Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite et la chaux ajoutée

La bentonite utilisée dans ce travail est extraite de la mine de Maghnia (Hammam Boughrara, à 600 km à l'ouest de la capitale d'Alger) par la société (ENOF). L'analyse de la composition granulométrique montre que la bentonite de Maghnia possède une granulométrie très fine. Environ 54% des grains ont un diamètre inférieur à 2 μm (Zenasni 2015).

Les caractéristiques physiques de la bentonite de Maghnia sont données dans le tableau ci-dessous (Tableau VI.1).

Tableau VI.1 Caractéristiques physiques de la bentonite utilisée (Zenasni 2015)

Caractéristiques	Valeur
Surface spécifique (m^2/g)	872
Gravité spécifique G_s	2.72
Indice de gonflement ($\text{cm}^3/2\text{g}$)	35
Absorption d'eau à la plaque (%)	900
Valeur au bleu (g/100g)	29.41
Ratio de gonflement	6.20
pH	10.1
Limite de liquidité (%)	216
Indice de plasticité (%)	120

Cette bentonite est caractérisée par une haute capacité de rétention d'eau. Sa composition chimique est plutôt siliceuse ($\text{SiO}_2 = 58.455\%$), avec une présence remarquable d'aluminium ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 17.143\%$) (Tableau VI.2). Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de cette bentonite est environ 3.41. Cette valeur est l'indice de la montmorillonite (Grim et Guven 1978).

Tableau VI.2 Composition chimique de la bentonite utilisée

Oxydes	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2
%	58.455	17.143	4.589	1.078	4.364	7.532	5.512	0.314

En revanche, la chaux utilisée est une chaux vive. Cette chaux est choisie en raison de sa proximité de notre lieu de travail expérimental. La chaux est produite par la société BMSD-

SARL située dans la ville de Saïda (Sud-Ouest de l'Algérie). Sa composition chimique est présentée au tableau (VI.3).

Tableau VI.3 Caractéristiques physico-chimiques de la chaux utilisée

Eléments chimiques	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	CO ₂	CaCO ₃	Densité spécifique	> 90 µm (%)	> 630 µm (%)	Matières insolubles (%)	Densité apparente (g/l)
%	> 83.3	< 0.5	< 2	< 1.5	< 2.5	< 0.5	0.4- 0.5	< 5	< 10	2	< 10	0	< 1	600-900

Les données chimiques rapportées montrent un pourcentage élevé en chaux libre CaO (83.3%) et une faible teneur en matériaux insolubles (<1%).

VI.3 L'effet de l'ajout de la bentonite et de la chaux sur la composition granulométrique des échantillons du lœss

Afin d'évaluer le changement de la texture physique du lœss en présence de la bentonite et la chaux, la méthodologie du travail adoptée consiste à étudier, l'effet de l'ajout des deux additifs à travers l'exploration de la granulométrie des mélanges (lœss-bentonite et lœss-chaux).

VI.3.1 L'effet de l'ajout de la bentonite sur la composition granulométrique

L'effet de la bentonite sur la granulométrie des échantillons est étudié à différentes concentrations. Des essais préliminaires montrent qu'à partir de la concentration de 2 % de bentonite, l'évolution du comportement du mélange (lœss-bentonite) commence à être perceptible. Les essais indiquent aussi que la valeur de 8 % représente un seuil à partir duquel le matériau de base commence à perdre ses propriétés intrinsèques. Dans la plage de ces deux valeurs-limites, différentes concentrations massiques de la bentonite sont appliquées (2 %, 4 %, 6 %, et 8 %). Le pas de mesure est choisi pour examiner de près l'évolution de la modification des comportements des échantillons étudiés.

Les résultats de l'ajout de la bentonite sur la composition granulométrique des deux échantillons du lœss (S₁) et (S₂) sont présentés respectivement dans les figures (VI.1) et (VI.2). Ces résultats montrent que l'introduction de la bentonite provoque une modification de la texture du lœss. Pour l'ensemble des concentrations appliquées, l'ajout de la bentonite est accompagné de facto par une augmentation de pourcentage des particules fines. La fraction

fine croît en fonction de la concentration de bentonite. Par conséquent, le pourcentage des particules grosses se trouve réduit.

La bentonite augmente la fraction d'argile dans les mélanges et modifie la configuration granulométrique vers une texture plus fine (Hassan et Mahmoud 2013 ; Yassad et Belkhodja 2007).

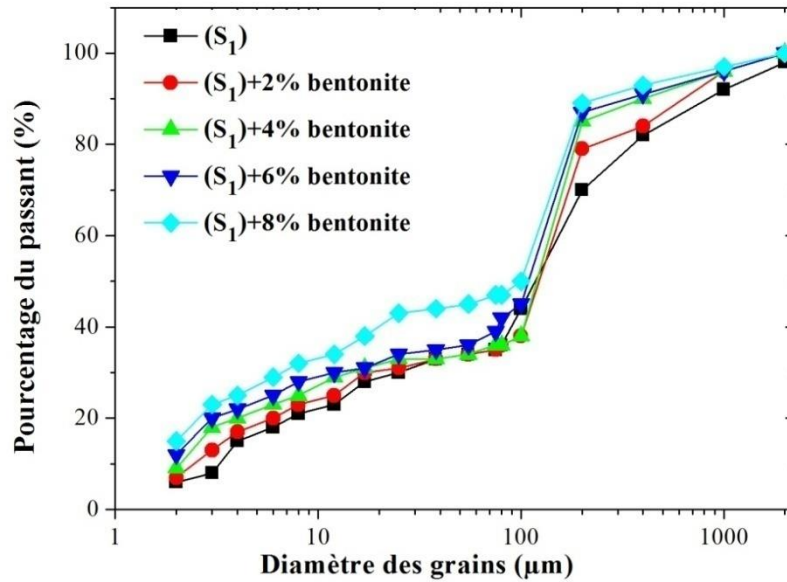


Figure VI.1. L'effet de l'ajout de la bentonite sur la composition granulométrique de l'échantillon (S_1)

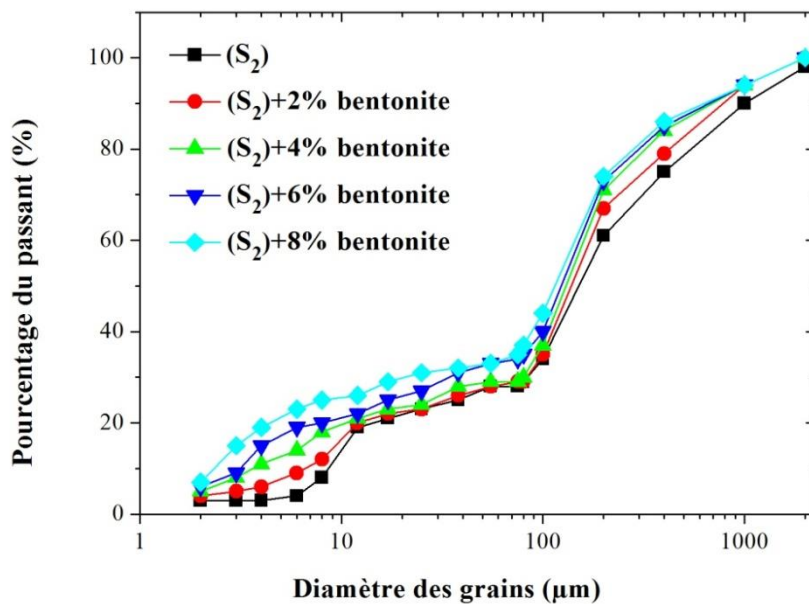


Figure VI.2. L'effet de l'ajout de la bentonite sur la composition granulométrique de l'échantillon (S_2)

VI.3.2 L'effet de l'ajout de la chaux sur la composition granulométrique

Pour les expériences relatives à l'étude de l'effet de l'ajout de la chaux, les concentrations sont choisies selon les mêmes considérations appliquées dans le cas de la bentonite. Ainsi, le protocole expérimentale a permet de définir les concentrations suivantes (1 %, 3 %, 5 %, 7 % et 10 %).

L'effet de l'ajout de la chaux sur la granulométrie des deux échantillons du loess est illustré sur les figures (VI.3) et (VI.4). Ces figures montrent respectivement la distribution granulométrique des deux échantillons (S_1) et (S_2) sans et avec l'addition de la chaux.

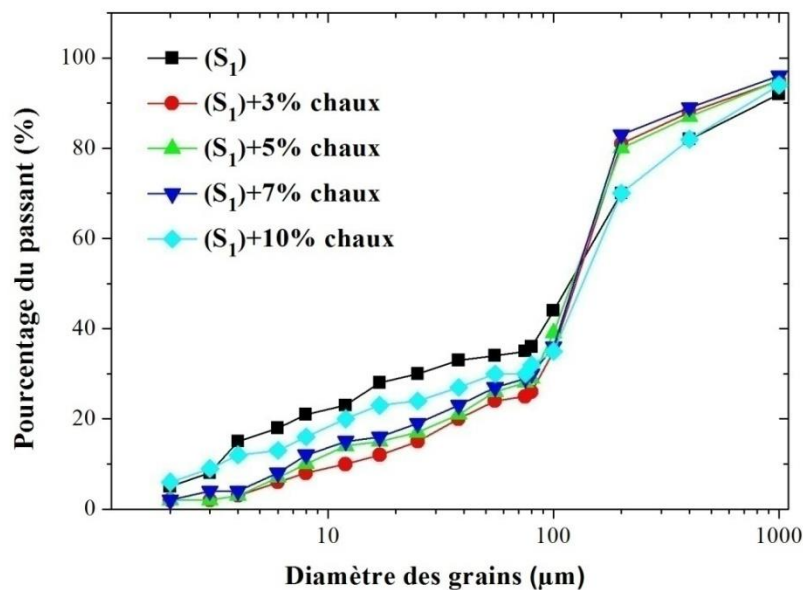


Figure VI.3. L'effet de l'ajout de la chaux sur la composition granulométrique de l'échantillon (S_1)

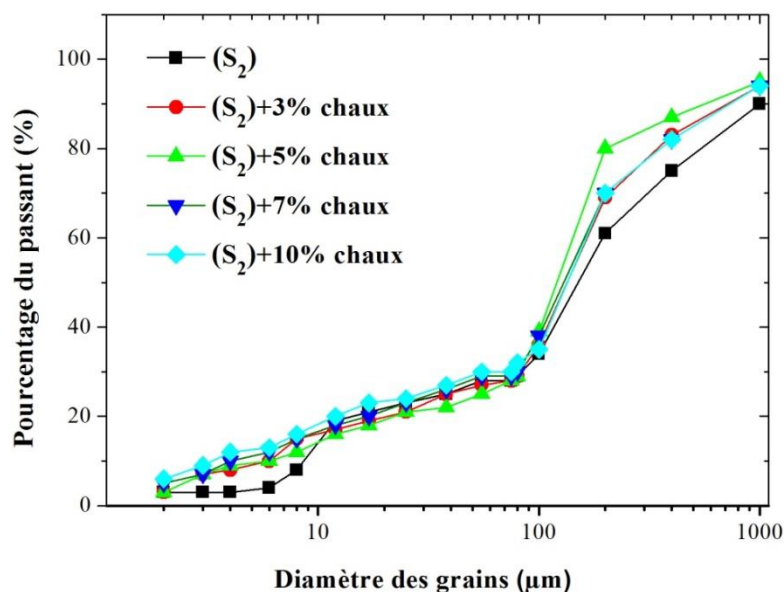


Figure VI.4. L'effet de l'ajout de la chaux sur la composition granulométrique de l'échantillon (S_2)

La présence de la chaux induit des échanges cationiques (ions positifs de la chaux et les particules négatives de l'échantillon) (Bell 1996). Ces échanges dépendent des propriétés de chaque échantillon notamment la fraction de l'argile. Ainsi, on a observé, pour le traitement à la chaux du loess expérimenté, une distinction de configurations de réactions entre les deux échantillons. L'effet de la chaux sur la granulométrie de l'échantillon (S_1) s'est manifesté à travers une légère augmentation de la fraction de gros-grains accompagné d'une diminution de la fraction fine (Figure VI.3). La genèse des grosses particules est due aux phénomènes de l'agrégation et l'agglomération des particules des mélanges provoqués par la chaux.

Contrairement à l'échantillon (S_1), le traitement par la chaux de l'échantillon (S_2) provoque une légère augmentation de la fraction de particules fines et une diminution de grosses particules (Figure VI.4). Ceci peut être expliquer par la différence de quantité d'argiles contenue dans les deux échantillons du loess (Bell 1996). En effet, les réactions d'échanges cationiques sont faiblement favorisées en raison de faible présence d'argile dans l'échantillon (S_2).

La qualité et la quantité initiale d'argile dans l'échantillon jouent donc un rôle prépondérant sur la sensibilité des échantillons aux traitements à la chaux. Dash et Hussain (2012) indiquent que l'effet de la chaux sur les sols dépend de plusieurs facteurs : la nature du sol, sa minéralogie et la teneur en chaux ajoutée.

VI.4 L'effet de l'ajout de la bentonite et de la chaux sur les propriétés de plasticité des échantillons du loess

Outre l'influence des additifs sur la granulométrie des différents mélanges, la sensibilité des échantillons traités à la bentonite et la chaux s'est traduite par la modification des propriétés de plasticité.

VI.4.1 L'effet de l'ajout de la bentonite sur les propriétés de plasticité

Les résultats de l'ajout de la bentonite sur les propriétés de plasticité (limite de liquidité, limite de plasticité et l'indice de plasticité) des deux échantillons du loess (S_1) et (S_2) sont présentés respectivement dans les figures (VI.5) et (VI.6).

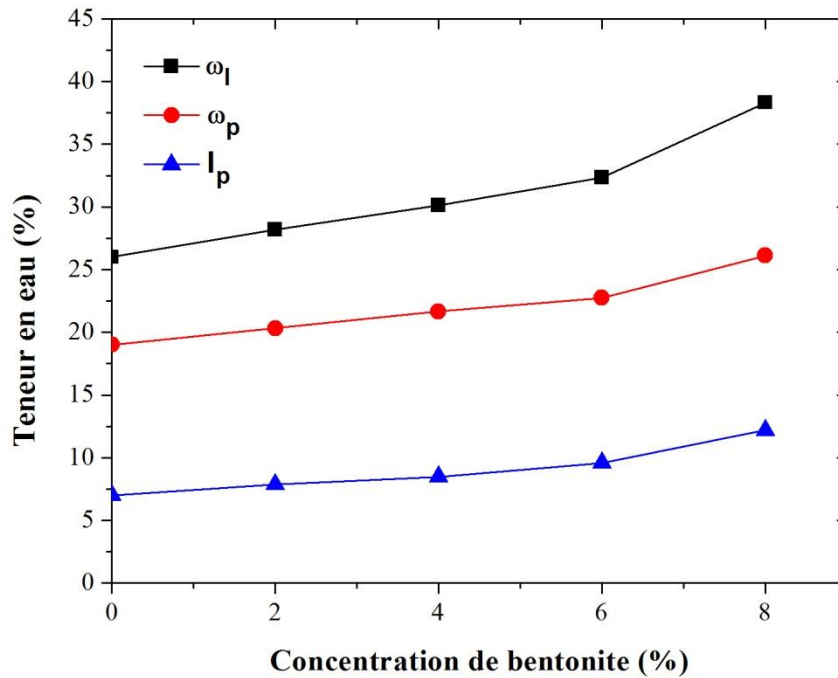


Figure VI.5. L'effet de l'ajout de la bentonite sur les propriétés de plasticité de l'échantillon (S₁)

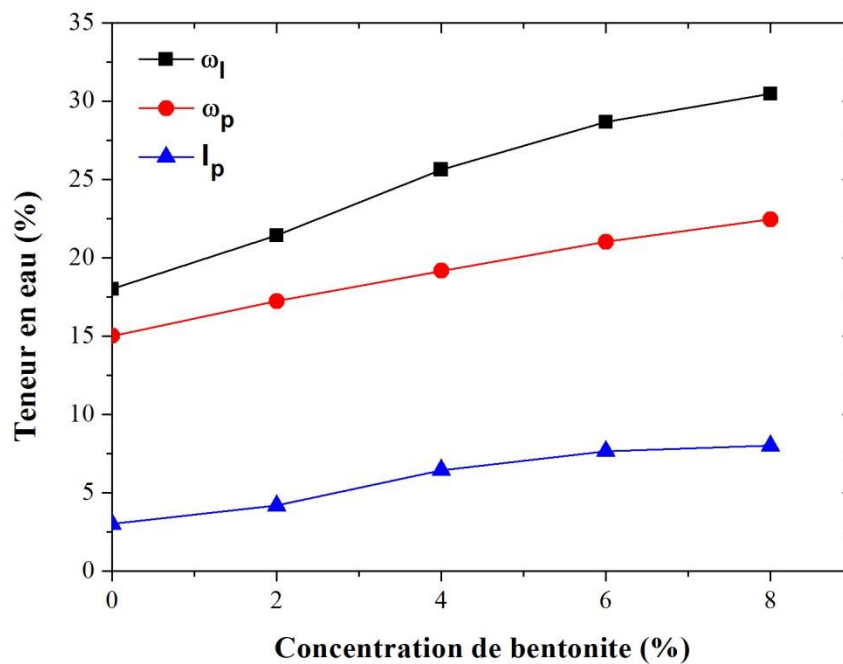


Figure VI.6. L'effet de l'ajout de la bentonite sur les propriétés de plasticité de l'échantillon (S₂)

Ces résultats indiquent que l'ajout de la bentonite permet l'amélioration de la plasticité des échantillons. De part de sa qualité de rétention d'eau, la bentonite augmente la capacité d'absorption d'eau des mélanges. Par ailleurs, l'addition de la bentonite aux deux échantillons augmente les limites de liquidité (ω_l) et de plasticité (ω_p). Pour une concentration de 8 % de bentonite, la limite de liquidité (ω_l) a augmenté de 26 % à 38 % pour l'échantillon (S₁), et de

18 % à 30 % pour l'échantillon (S_2). Pour les deux échantillons (S_1) et (S_2), la limite de plasticité (ω_p) croît respectivement de 19 % à 26 % et de 15 % à 22 %. Par ailleurs, l'indice de plasticité augmente jusqu'à 12 % pour (S_1) et à 8 % pour (S_2).

Pour la même concentration, le taux d'augmentation de l'indice de plasticité est plus important dans (S_2) que (S_1) (50 % pour l'échantillon (S_1) et de 62 % pour l'échantillon (S_2)). En raison de sa capacité de rétention d'eau, la bentonite favorise l'hydratation des particules des mélanges loess-bentonite. Par ailleurs, la plasticité augmente avec la concentration de l'additive (Yassad et Belkhodja 2007 ; Wayal et al.2012 ; Elmashad 2018 ; Zhang et al. 2019).

VI.4.2 L'effet de l'ajout de la chaux sur les propriétés de plasticité

La sensibilité des valeurs des limites d'Atterberg du loess traité à la chaux à différentes concentrations est illustrée dans la figure (VI.7) pour l'échantillon (S_1) et dans la figure (VI.8) pour l'échantillon (S_2).

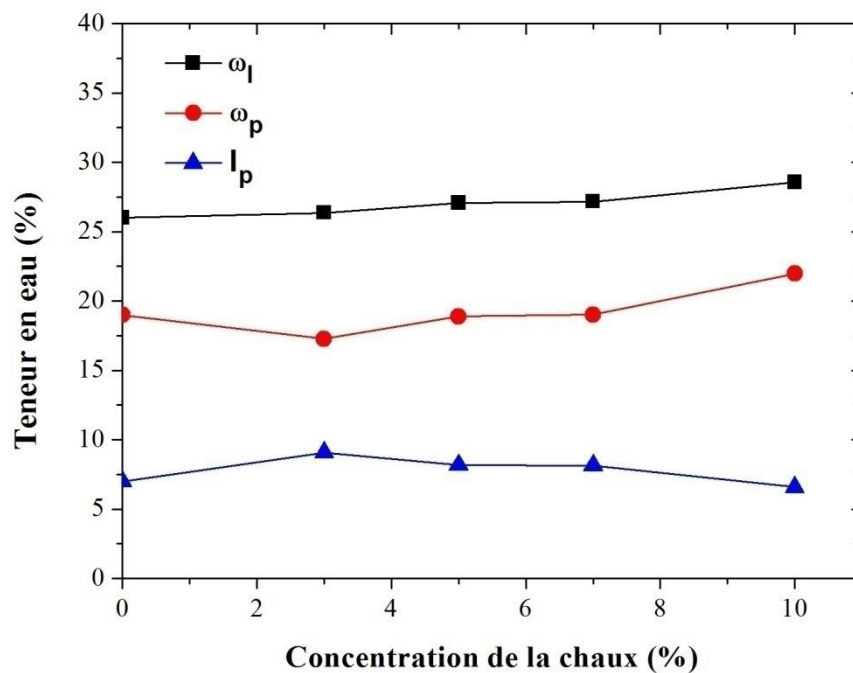


Figure VI.7. L'effet de l'ajout de la chaux sur les propriétés de plasticité de l'échantillon (S_1)

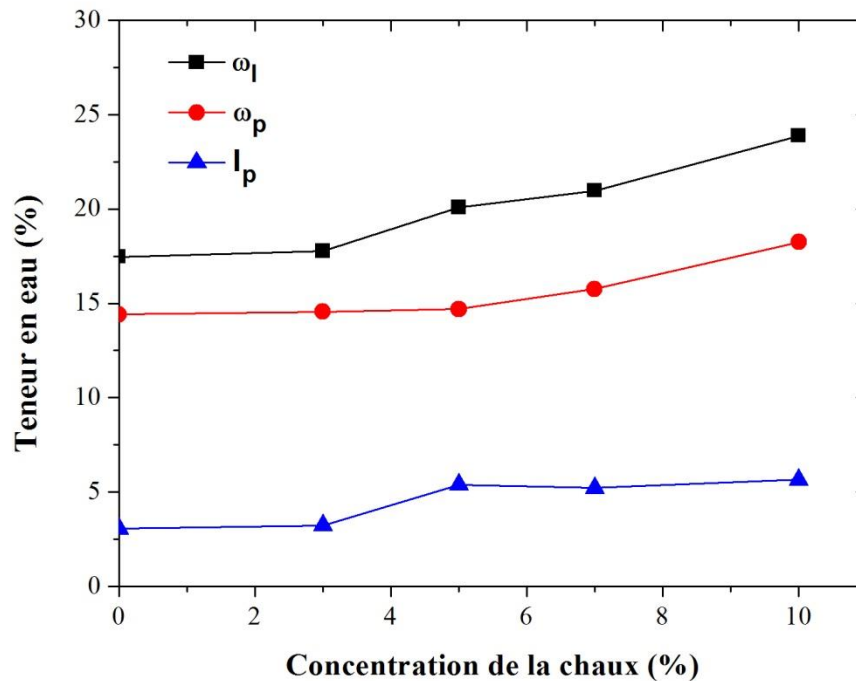


Figure VI.8. L'effet de l'ajout de la chaux sur les propriétés de plasticité de l'échantillon (S_2)

Sur les deux figures, on observe qu'avec l'augmentation de la teneur en chaux ajoutée, une légère augmentation des limites de liquidité et celle de plasticité. Les mêmes résultats sont observés par Arabi and Wild (1989). De plus, pour l'échantillon (S_2), l'indice de plasticité a augmenté avec de faibles concentrations de chaux. Il reste stable à partir de la concentration de 5 %. Cependant, la valeur de cet indice diminue pour l'échantillon (S_1).

Pour les deux échantillons, la quantité et la qualité des minéraux argileux présents dans le loess peuvent expliquer la différence d'effet de la chaux sur la plasticité des deux échantillons (S_1) et (S_2). Les travaux de Bell (1996) ont conclu que l'ajout de la chaux en présence du quartz et de kaolinite augmente la plasticité. Toutefois, en présence de montmorillonite, la plasticité diminue. L'échantillon (S_2) contient du quartz et de la kaolinite, tandis que l'échantillon (S_1) contient de la montmorillonite.

Tous les sols argileux réagissent avec la chaux. Les minéraux argileux dans le sol, même en infimes quantités, contribuent à modifier les propriétés physiques, notamment la plasticité du sol traité (Acevedo et al. 2017 ; Bessaim et al. 2018 ; Ural 2018 ; Elgamouz et al. 2019).

VI.5 L'effet des additifs sur le pH et la conductivité électrique(CE) des échantillons du loess

La sensibilité chimique du loess traité à la fois par la bentonite et la chaux est examinée à travers l'évolution du pH et la conductivité électrique.

VI.5.1 L'effet de l'ajout de la bentonite sur le pH et la conductivité électrique(CE)

Pour des échantillons (S_1) et (S_2), l'effet de la bentonite sur le pH est présenté respectivement dans les figures (VI.9) et (VI.10). Les résultats indiquent que l'addition progressive de la bentonite entraîne une augmentation du pH. Pour l'échantillon (S_1), la valeur initiale du pH du sol est de 8.4. Avec l'addition de 2 % de bentonite, le pH du mélange atteint 8.6 et augmente à environ 9.2 avec un pourcentage de 8 %. Les mêmes résultats sont observés pour l'échantillon (S_2), où la valeur initiale du pH du sol est de 9.2. Le pH de l'échantillon (S_2) augmente à 9.4 avec 2% de bentonite. Ensuite, il augmente jusqu'à 9.8 avec un pourcentage de bentonite de 8 %. Les résultats sont en accord avec ceux observés par d'autres chercheurs (Semalulu et al. 2015; Alghamdi et al. 2018).

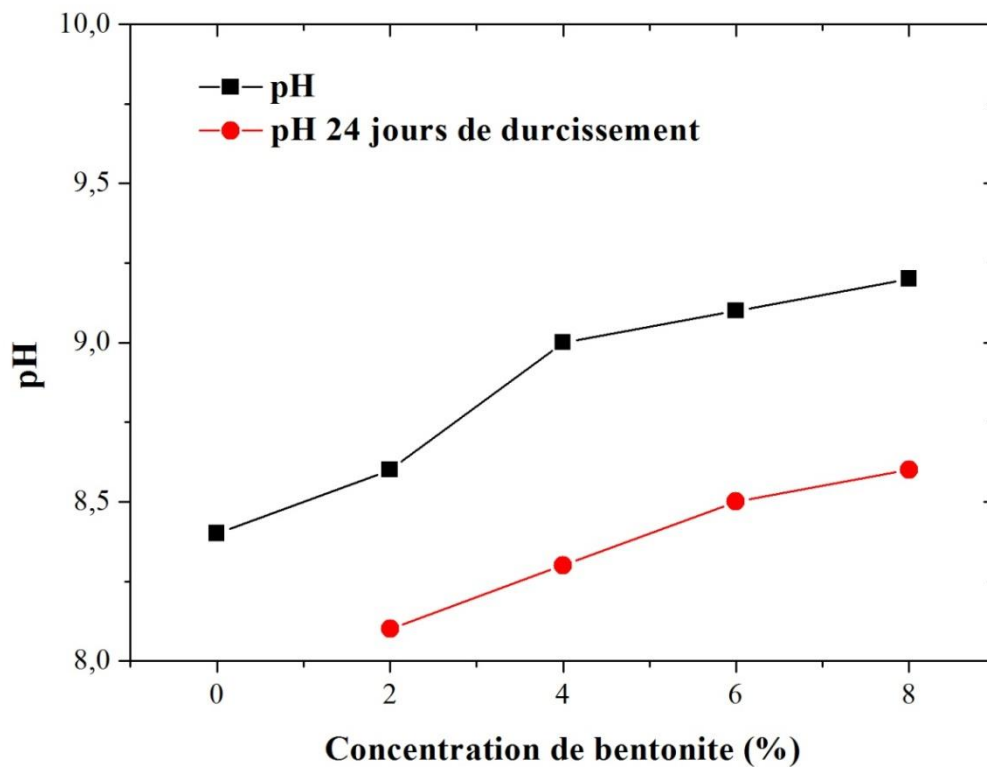


Figure VI.9. L'effet de la bentonite sur le pH de l'échantillon (S_1)

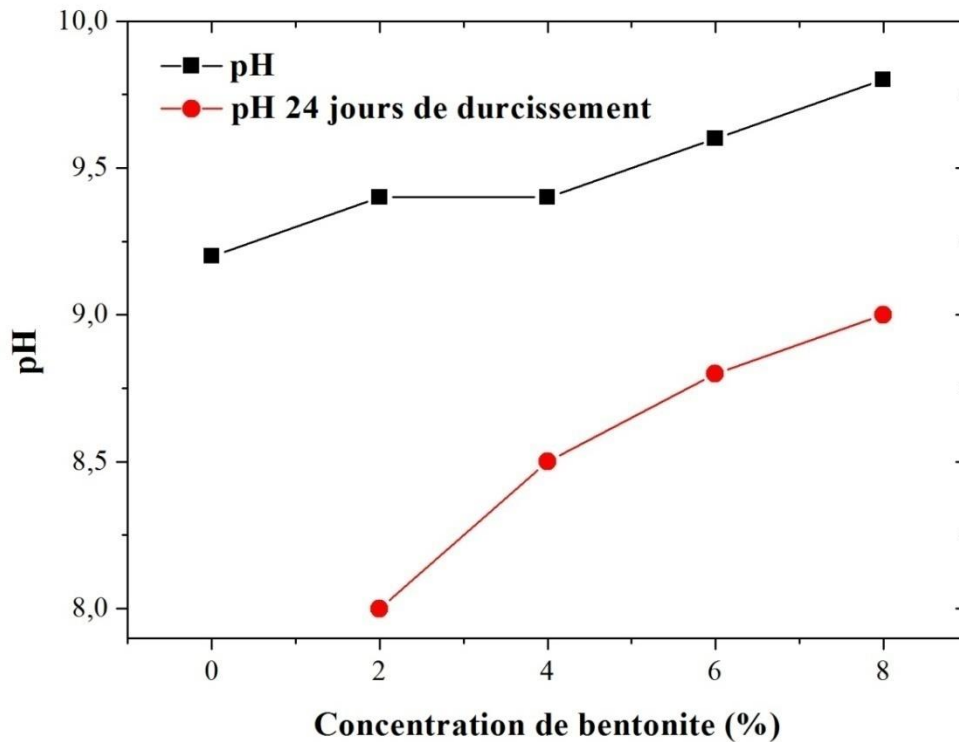


Figure VI.10. L'effet de la bentonite sur le pH de l'échantillon (S₂)

En revanche, la variation de la conductivité électrique (CE) du (S₁) et (S₂) avec l'addition de la bentonite est présentée sur les figures (VI.11) et (VI.12). Dans les deux échantillons, après l'ajout de la bentonite, on observe une augmentation de la valeur de (CE). Avec l'addition de 8 %, la conductivité électrique augmente de 2.27 (mS/cm) à 4.8 (mS/cm) pour l'échantillon (S₁) et de 3.3 (mS/cm) à 4.3 (mS/cm) pour celui du (S₂). Le taux d'augmentation de ces valeurs peut atteindre 8 %. Les résultats sont cohérents avec les travaux de Yssaad et Belkhodja (2007) ; Kaufhold et al. (2008). L'augmentation peut s'expliquer par la libération des cations échangeables (Na⁺, Ca⁺² et Mg⁺²) suite à la dissolution des éléments chimiques qui composent la bentonite. L'ajout de la bentonite induit une amélioration de la capacité d'échange cationique dans le milieu traité (Kaufhold et al. 2008 ; Carmo et al. 2016).

Après 24 jours de durcissement, le pH des échantillons traités à la bentonite a diminué. En revanche, les valeurs de CE sont augmentées avec l'augmentation de la quantité de bentonite.

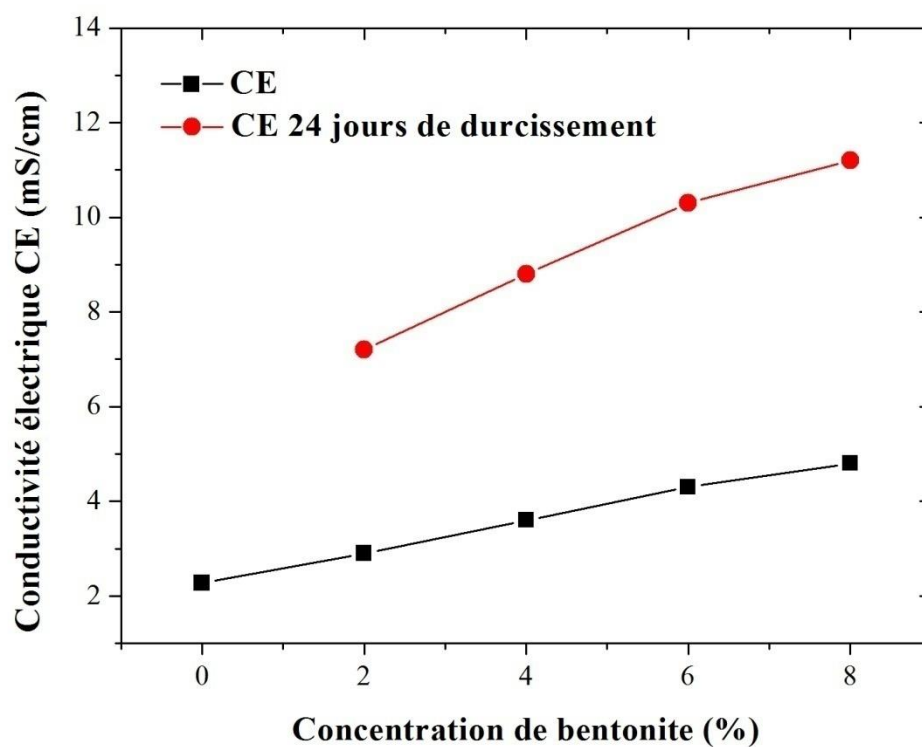


Figure VI.11. L'effet de la bentonite sur la conductivité électrique de l'échantillon (S₁)

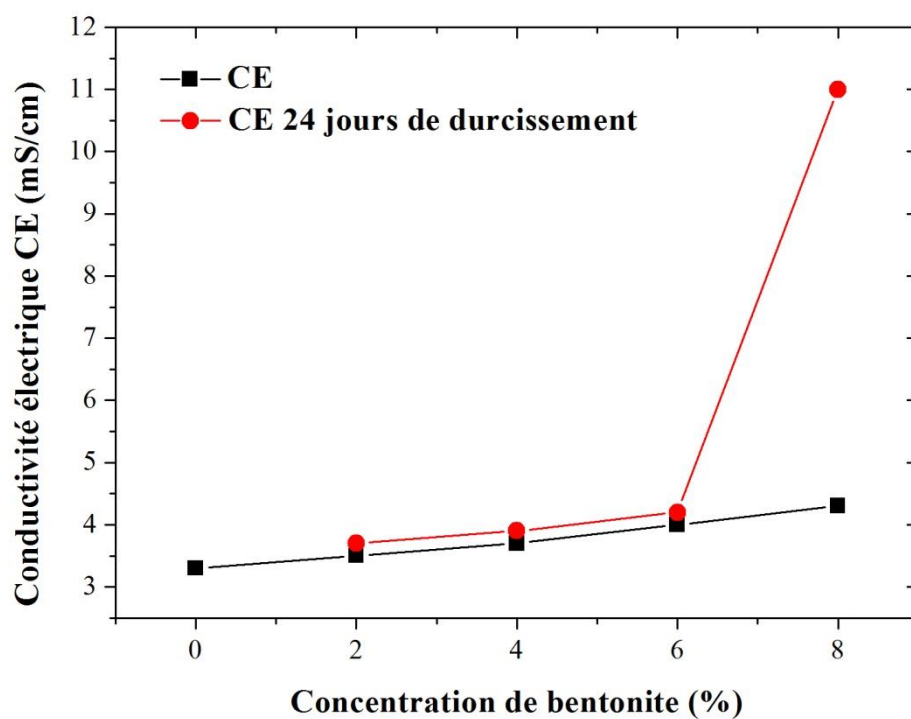


Figure VI.12. L'effet de la bentonite sur la conductivité électrique de l'échantillon (S₂)

VI.5.2 L'effet de l'ajout de la chaux sur le pH et la conductivité électrique (CE)

Quant au traitement à la chaux, dès les premières doses, la forme des courbes de variation du pH en fonction de la concentration de la chaux se traduit par une augmentation rapide. Pour l'échantillon (S_1), avec 1 % de chaux, le pH du mélange atteint 12.3 et augmente à environ 12.6 avec un pourcentage de chaux de 5 %. Après cela, la courbe montre une légère augmentation du pH jusqu'à une valeur constante de 12.9 à une concentration de 10 % (Figure VI.13). Les mêmes résultats sont observés pour l'échantillon (S_2), où la valeur du pH augmente rapidement à 12.7 avec 1 % de chaux, et de 12.8 pour une concentration de chaux de 5 %. Après cela, la courbe montre une augmentation lente pour atteindre une valeur constante égale à 12.9 avec 10 % de chaux (Figure VI.14). Les mêmes résultats sont observés dans les travaux de Bessaim et al. (2018) ; Zhang et al. (2019).

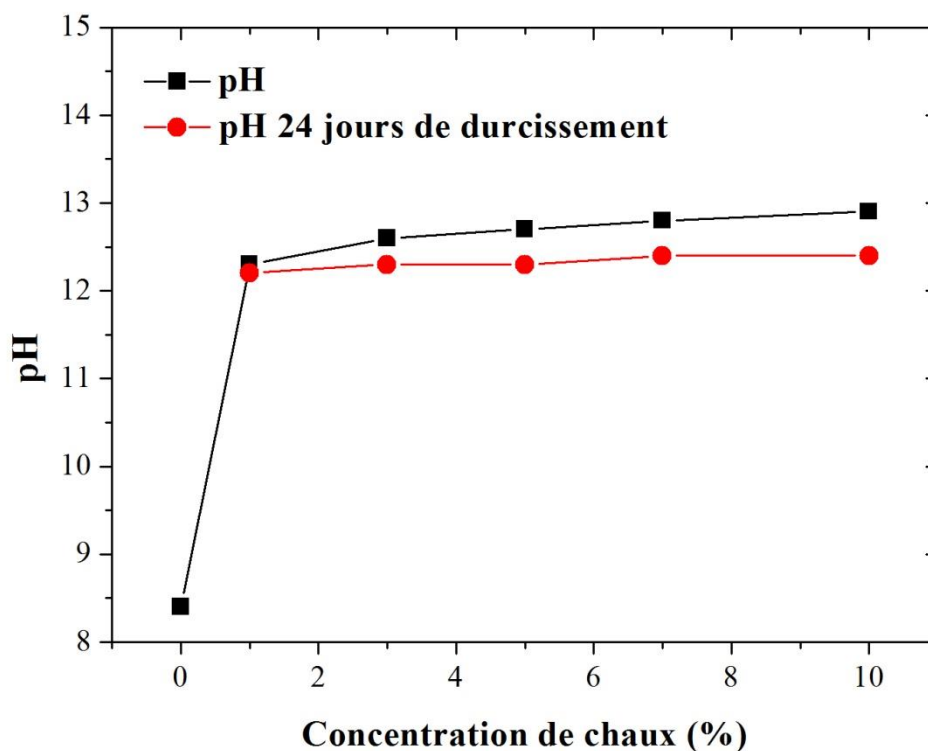


Figure VI.13. L'effet de la chaux sur le pH de l'échantillon (S_1)

Les observations relevées peuvent être expliquées par la dissolution des particules de chaux dans les différents mélanges, en modifiant le milieu et le rendre plus basique. En augmentant la concentration de l'additif, la dissolution de ces particules génère plus d'ions de calcium

Ca^{2+} et hydroxyle (OH^-) et permet la saturation de la suspension avec une augmentation des valeurs de pH (Al-Mukhtar et al. 2012 ; Vitale et al. 2017; Dhar et Hussain 2019).

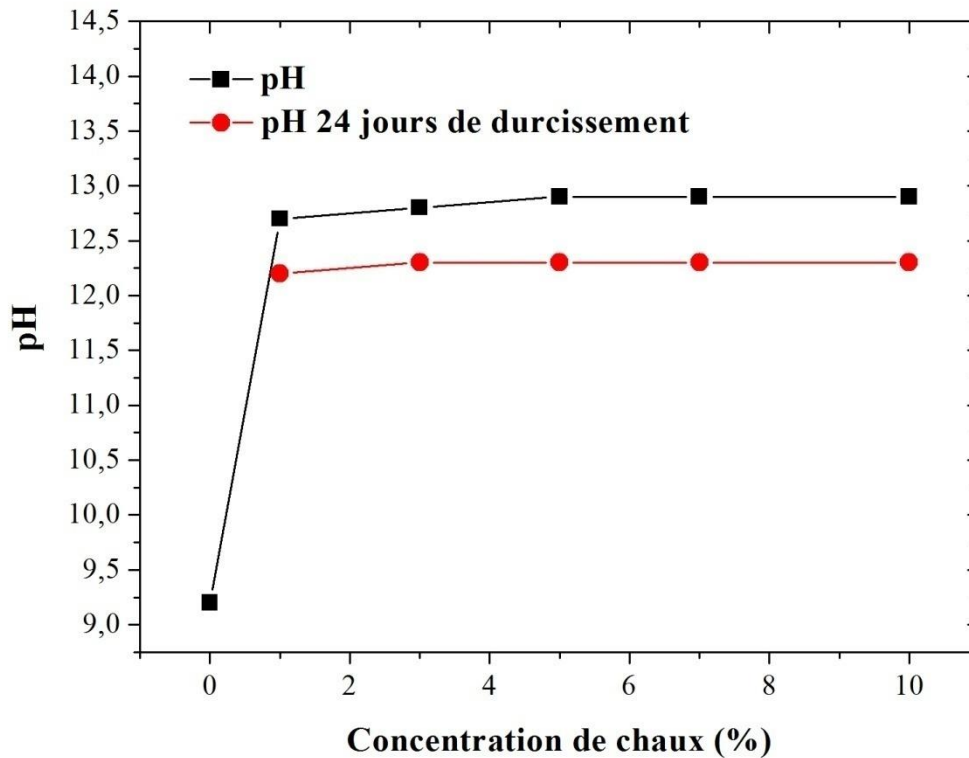


Figure VI.14. L'effet de la chaux sur le pH de l'échantillon (S₂)

Outre l'évolution des valeurs de pH, les résultats indiquent également que la conductivité électrique (CE) est influencée par l'ajout de la chaux. En effet, l'augmentation de la concentration de la chaux induit une augmentation brusque des valeurs de (CE) (Figures VI.15, VI.16). Cette augmentation est justifiée par la génération d'ions de calcium (Ca^{2+}) et hydroxyle (OH^-), résultant de la dissolution de la chaux dans la structure des pores du sol (Zhang et al. 2019). Les mêmes résultats sont révélés par (Lima et al. 2010 ; Bellil et al. 2018 ; Dhar et Hussain 2019).

Après 24 jours de durcissement des mélanges, le pH et la conductivité électrique (CE) des deux échantillons (S₁) et (S₂) diminuent. La consommation de chaux lors du développement de la réaction pouzzolanique est à l'origine de cette baisse (Dhar et Hussain 2019). Pendant les périodes de durcissement, le pH des échantillons traités à la chaux s'est révélé supérieur à 12. Cela indique que le milieu est favorable à la formation de produits en gel du type CSH et CAH (Dash et Hussain 2012).

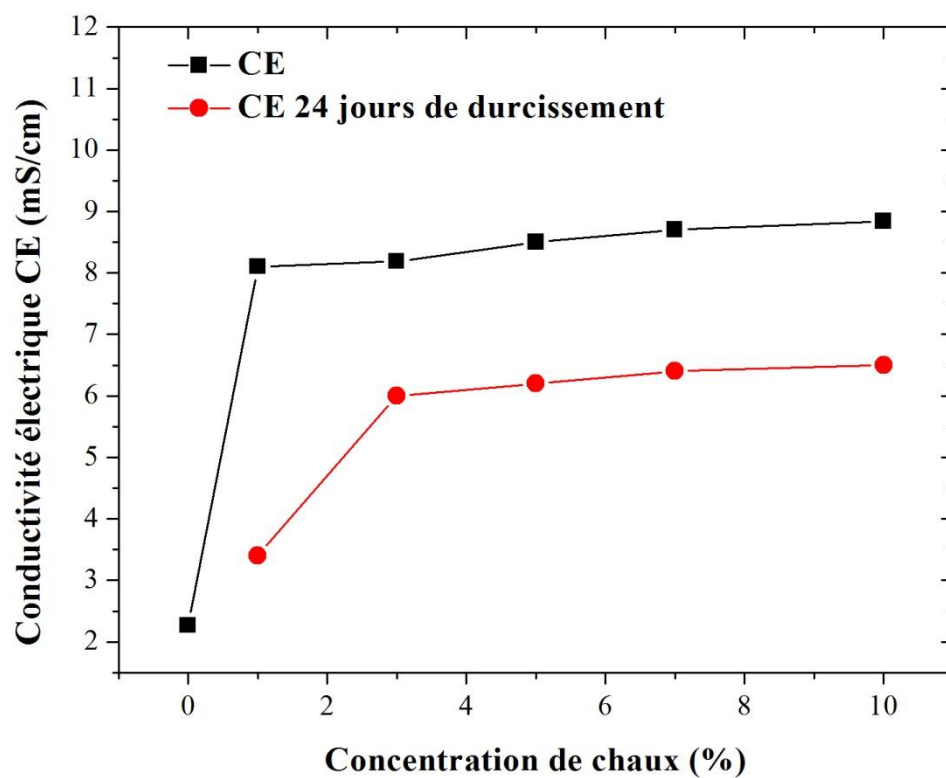


Figure VI.15. L'effet de la chaux sur la conductivité électrique de l'échantillon (S₁)

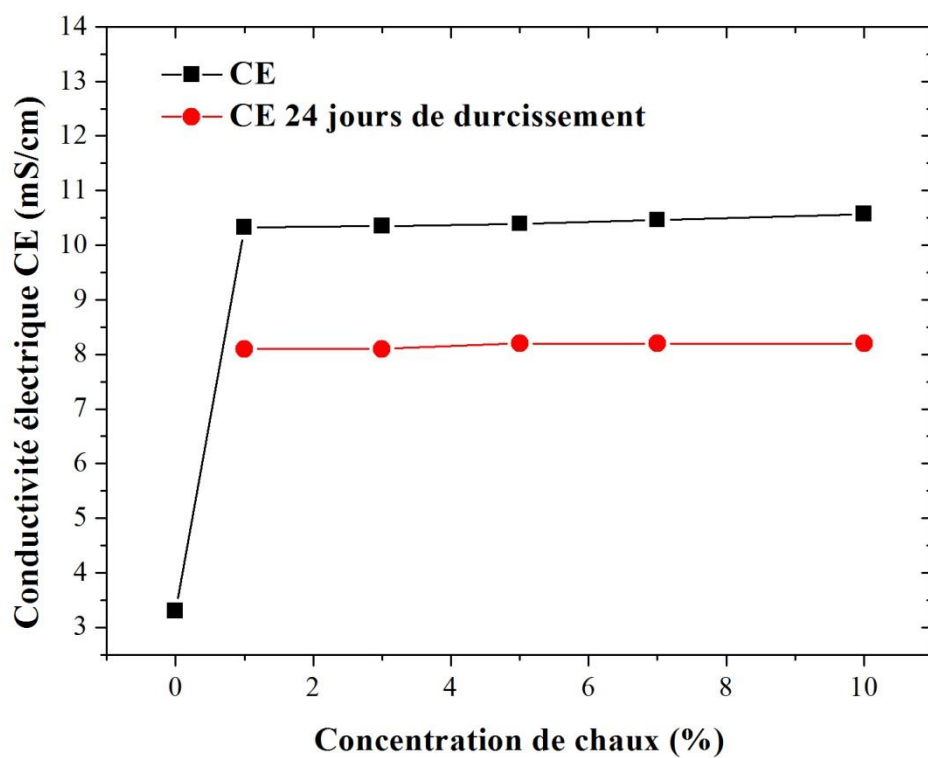


Figure VI.16. L'effet de la chaux sur la conductivité électrique de l'échantillon (S₂)

VI.6 Conclusion

Le présent chapitre est consacré à l'analyse de l'effet de l'addition de la bentonite et la chaux sur les propriétés physico-chimiques du lœss. Les résultats des tests physiques ont montré que l'introduction de la bentonite et la chaux dans les suspensions entraîne une modification de la texture du lœss et améliore la plasticité des mélanges. En explorant les changements du pH et de la conductivité électrique, l'examen chimique a montré des modifications structurelles dans les mélanges étudiés.

Chapitre VII

L'effet de l'ajout des additifs sur le
comportement rhéologique des
suspensions du loess

VII.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'effet de l'ajout de la bentonite et la chaux sur le comportement rhéologique des suspensions du lœss est étudié et discuté. La sensibilité rhéologique des suspensions est examinée à travers l'examen des courbes d'écoulement et celles de la viscosité. En analysant les résultats de la viscosité et l'évolution des paramètres rhéologiques, les conditions d'amélioration des caractéristiques de résistance des mélanges lœss-bentonite et lœss-chaux sont identifiés, expérimentés et évalués.

VII.2 Préparation des suspensions 'lœss-bentonite' et 'lœss-chaux' et protocole de mesure rhéologique

L'effet des additifs (bentonite ou chaux) est étudié sur la plus faible concentration massique en lœss ($C_m=30\%$). Cette valeur de concentration suffit de mettre en évidence l'effet de chaque additif sur la suspension du lœss. Elle répond aussi et surtout aux conditions optimales d'utilisation des moyens et des matériaux expérimentaux. La suspension de base lœss-eau ($C_m=30\%$) est aussi utilisée comme référence pour la comparaison avec les suspensions des mélanges lœss-additifs.

Pour étudier l'effet des additifs (bentonite ou chaux) sur le comportement rhéologique, le protocole expérimental suivant est défini et adapté. Ce protocole consiste, dans une première étape, de soumettre la suspension de base lœss-eau ($C_m=30\%$) à une agitation à 500 tr/min pendant 24 h. Par la suite, l'additif est introduit progressivement, sous agitation mécanique, jusqu'à atteindre la concentration d'expérimentation. L'échantillon obtenu lui aussi est soumis à une agitation mécanique continue à 500 tr/min pendant 24 heures. Le même protocole est répété pour les autres concentrations des additifs.

Le même protocole expérimental est appliqué aussi pour les mesures rhéologiques des suspensions des mélanges.

VII.3 Résultats des tests rhéologiques

VII.3.1 L'effet de l'ajout de la bentonite et la chaux sur le comportement en écoulement des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m = 30\%$)

Les figures (VII.1) et (VII.2) représentent respectivement l'évolution de la contrainte de cisaillement τ (Pa) en fonction de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ (s^{-1}), à différentes concentrations

massiques de la bentonite (2 %, 4 %, 6 %, et 8 %) pour les échantillons examinés. En revanche, pour le cas du traitement à la chaux, à différentes concentrations (1 %, 3 %, 5 %, 7 %, et 10 %), les figures (VII.3) et (VII.4) montrent le comportement en écoulement des deux suspensions. Les modèles de Bingham, d'Ostwald et d'Herschel-Buckley sont expérimentés pour l'ensemble des échantillons. Les essais de comparaison entre les différents modèles confirment la performance du modèle d'Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$) (Figures (VII.1), (VII.2), (VII.3) et (VII.4)). À travers l'examen des figures, il s'avère que le modèle d'Herschel-Bulkley est le plus adapté. Il reproduit convenablement le comportement rhéologique des deux suspensions. Il se distingue par sa simplicité, sa performance et son ajustement avec les résultats expérimentaux (contrainte seuil - consistance). Dans ce cadre, il est à noter que d'autres chercheurs ont rapporté que les suspensions argileux peuvent être mieux décrites par la loi d'Herschel-Bulkley (Coussot 1997; Benyounes et al. 2007).

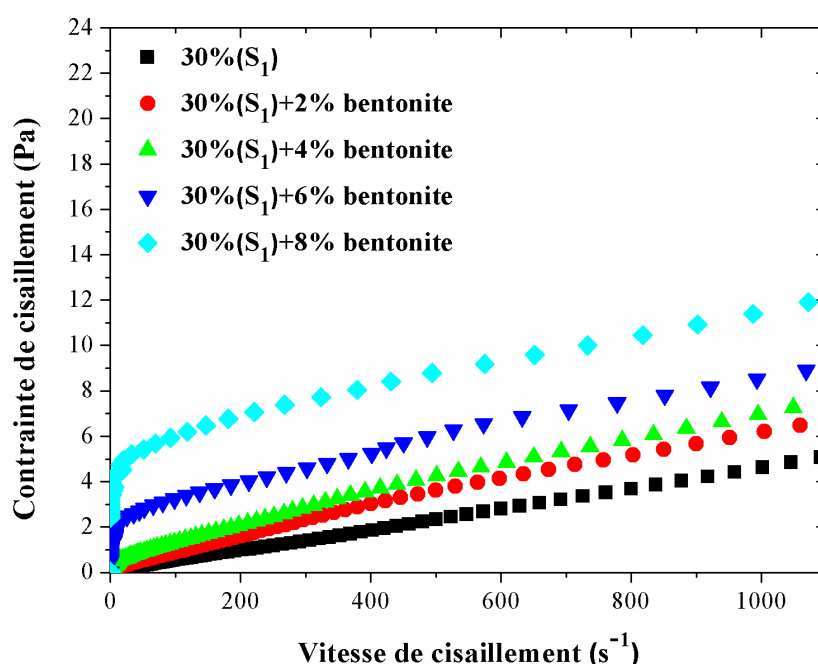


Figure VII.1. L'effet de la l'ajout de la bentonite à différentes concentration sur l'écoulement de la suspension (S₁) à une concentration massique (C_m=30%)

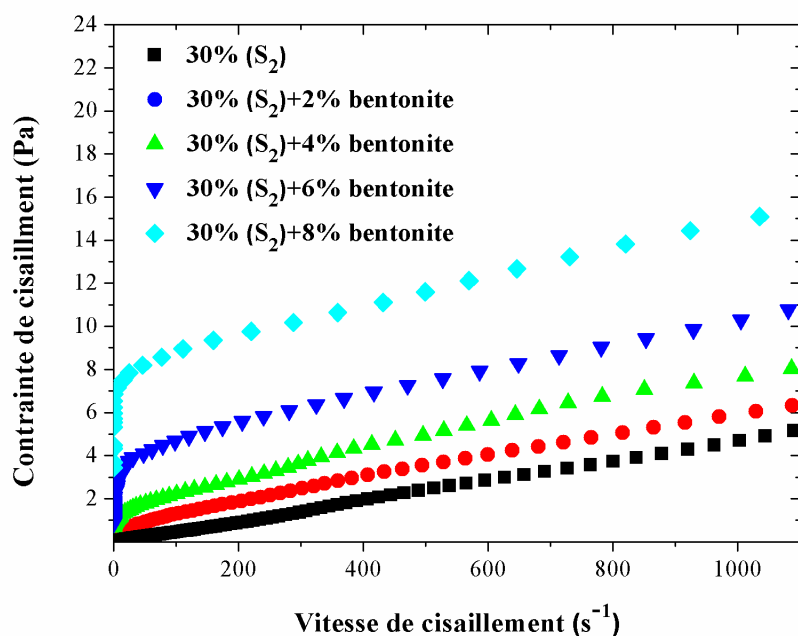


Figure VII.2. L'effet de l'ajout de la bentonite à différentes concentrations sur l'écoulement de la suspension (S_2) à une concentration massique ($C_m=30\%$)

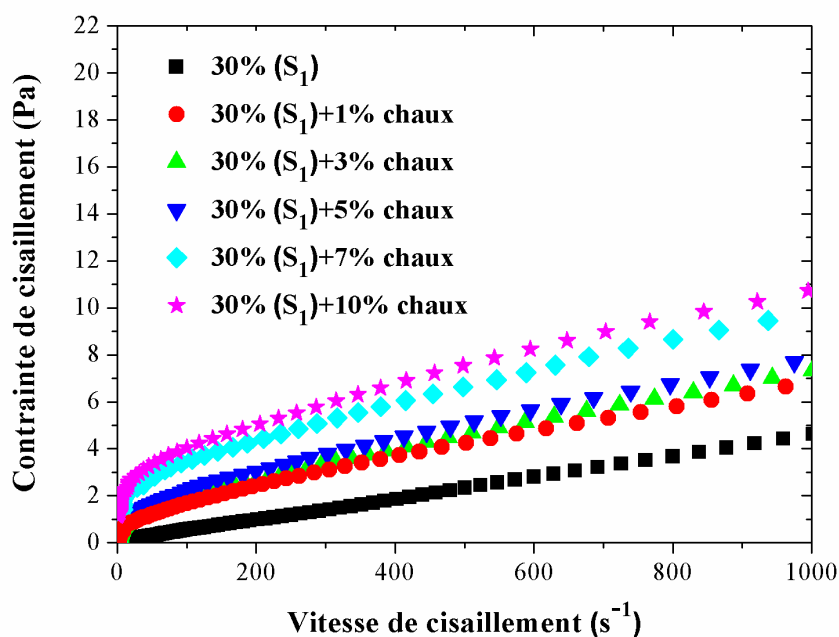


Figure VII.3. L'effet de l'ajout de la chaux à différentes concentrations sur l'écoulement de la suspension (S_1) à une concentration massique ($C_m=30\%$)

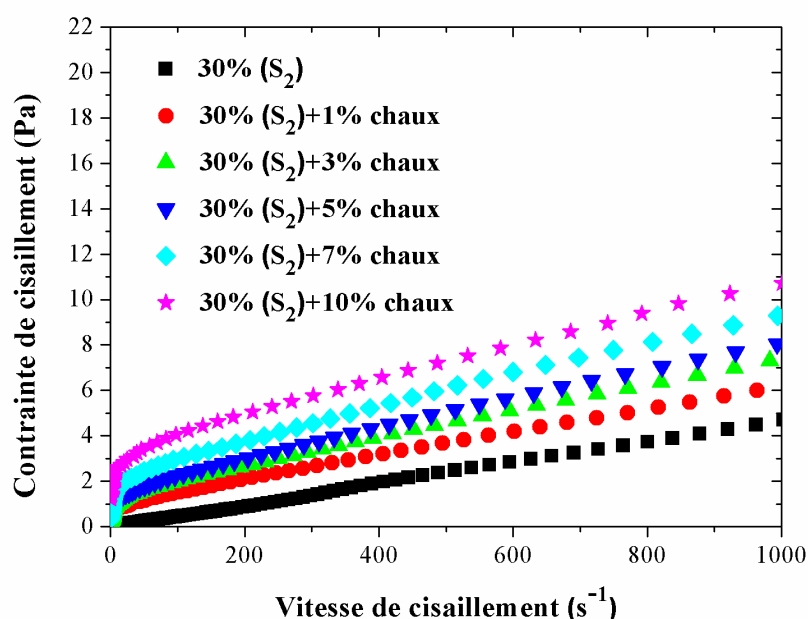


Figure VII.4. L'effet de l'ajout de la chaux à différentes concentrations sur l'écoulement de la suspension (S_2) à une concentration massique ($C_m=30\%$)

Par ailleurs, les résultats des figures (VII.1, VII.2, VII.3 et VII.4) montrent que le comportement en écoulement change de l'aspect newtonien à non-newtonien pour une concentration critique de (30 %). Ce changement de comportement est attribué aux interactions particule-particule et à la nature de leurs liaisons. Cheng (1980) a expliqué qu'en dessous des concentrations critiques (faibles et moyennes), les effets des interactions hydrodynamiques dominant et provoquant la dissipation visqueuse de la suspension. Pour des concentrations élevées, l'effet de contact particule-particule domine les effets hydrodynamiques. Le contact particule-particule génère des interactions de frottement et le comportement des mélanges est devenu non newtonien (Phillips et Davies 1991). L'analyse des courbes d'écoulement montrent également que la contrainte de cisaillement augmente avec les concentrations des additifs ajoutées. La bentonite et la chaux favorisent la floculation entre les particules, réduisent le volume des pores du loess et génèrent des liaisons qui rendent la suspension plus dense (Gao et al.2018; Bellil et al.2018; Zhang et al.2019).

VII.3.2 L'effet de l'ajout de la bentonite et de la chaux sur la viscosité des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m = 30\%$)

En fonction de la concentration massique de la bentonite ajoutée, les figures (VII.5) et (VII.6) montrent respectivement l'évolution de la viscosité des deux suspensions (S_1) et (S_2). Pour le

cas du traitement à la chaux, l'effet de l'additif sur la viscosité des suspensions est illustré dans les figures (VII.7) et (VII.8).

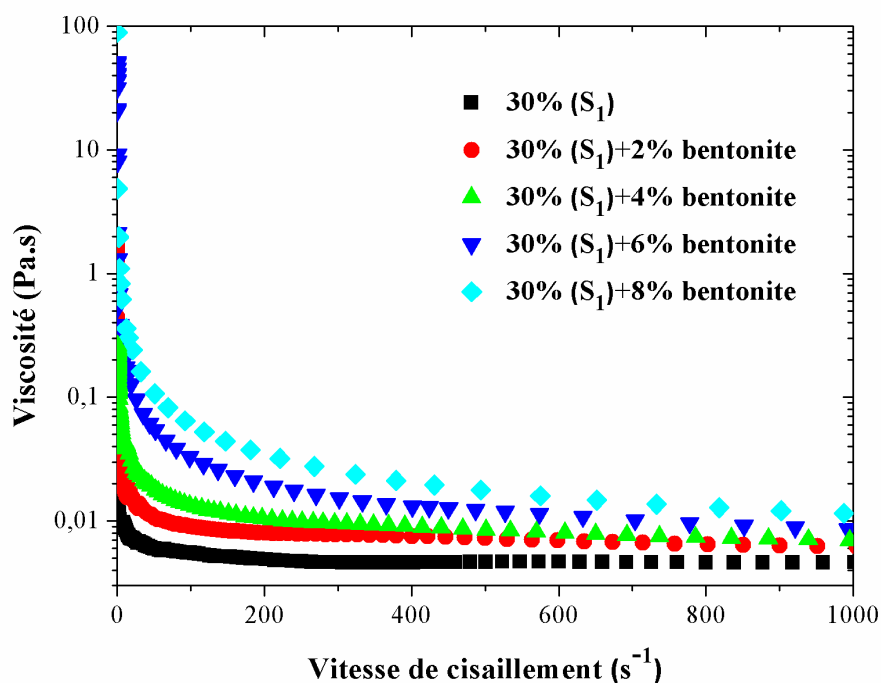


Figure VII.5. L'effet de la l'ajout de bentonite à différentes concentrations sur la viscosité de la suspension (S_1) à une concentration massique ($C_m=30\%$)

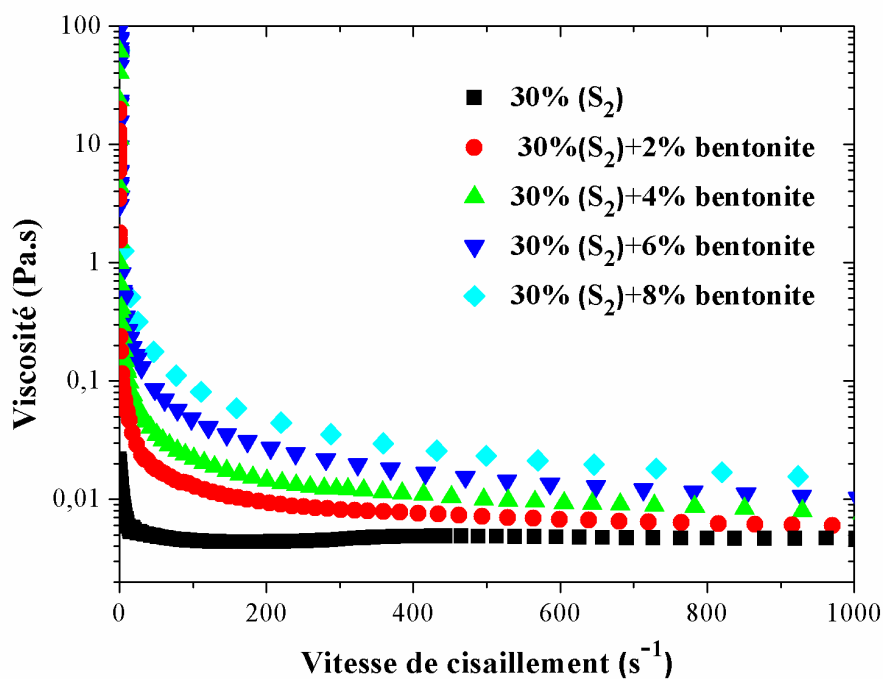


Figure VII.6. L'effet de la l'ajout de bentonite à différentes concentrations sur la viscosité de la suspension (S_2) à une concentration massique ($C_m=30\%$)

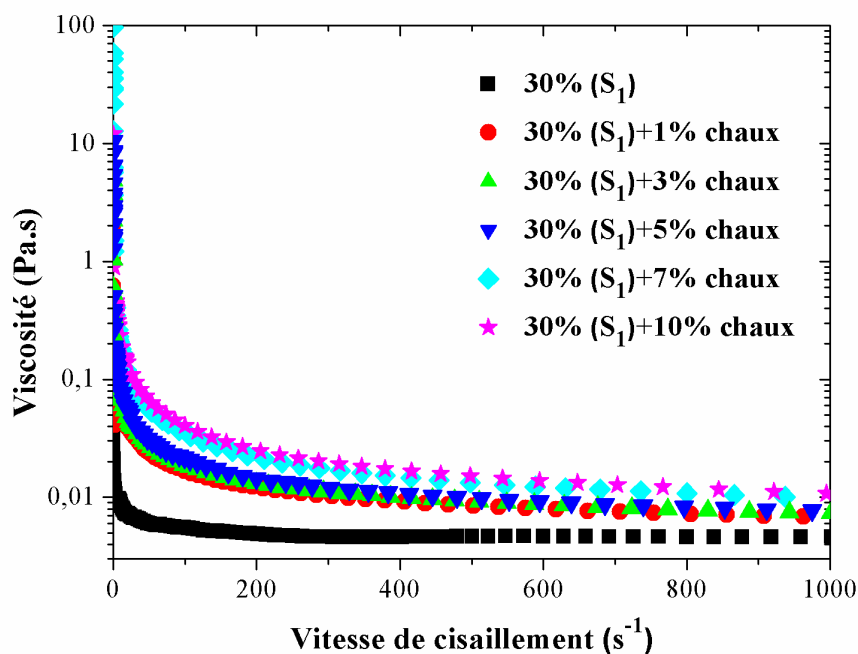


Figure VII.7. L'effet de l'ajout de la chaux à différentes concentrations sur la viscosité de la suspension (S_1) à une concentration massique ($C_m=30\%$)

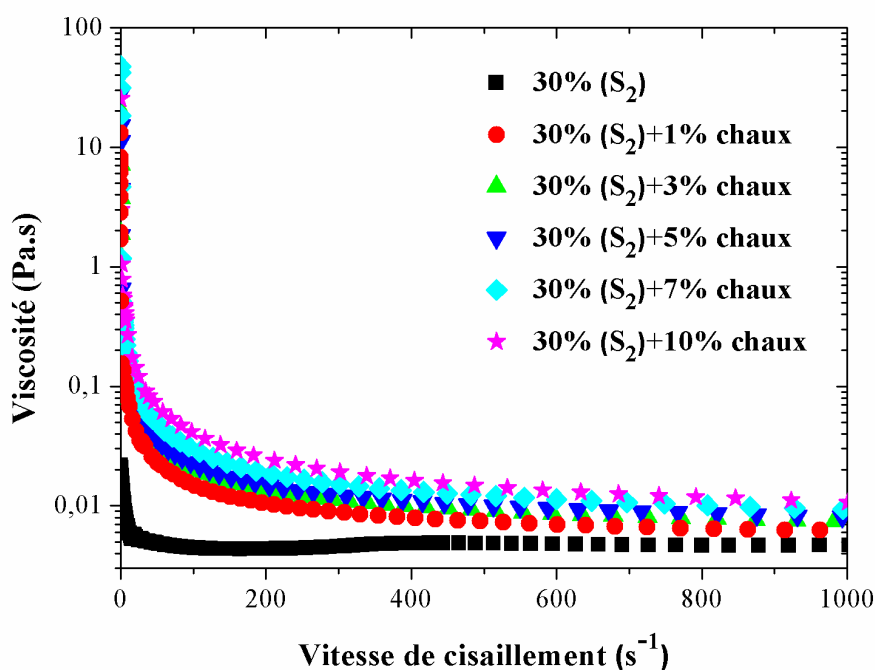


Figure VII.8. L'effet de l'ajout de la chaux à différentes concentrations sur la viscosité de la suspension (S_2) à une concentration massique ($C_m=30\%$)

Pour les deux suspensions, les résultats montrent que la viscosité des mélanges augmente avec l'augmentation de la concentration des additifs. L'augmentation ainsi observée et qui est induite par les additifs est due à la formation des floccs sous forme des chaînes dans les mélanges (Barnes et al. 1989 ; Maurya et Mandal 2016).

VII.3.3 L'effet de l'ajout de la bentonite et de la chaux sur l'évolution des paramètres rhéologiques du modèle d'Herschel-Buckley des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m = 30\%$)

Sous l'effet de l'ajout de la bentonite et la chaux, à différentes concentrations, la réponse au cisaillement des deux suspensions est évaluée à travers l'évolution des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley (contrainte seuil, consistance et l'indice d'écoulement).

Pour les deux suspensions (S_1) et (S_2), l'influence de la concentration de la bentonite sur les paramètres rhéologiques est illustrée sur les figures (VII.9), (VII.10) et (VII.11). Les figures (VII.9) et (VII.10) montrent l'évolution du seuil d'écoulement et de l'indice de consistance des suspensions. En outre, l'évolution de l'indice d'écoulement est illustrée sur la figure (VII.11).

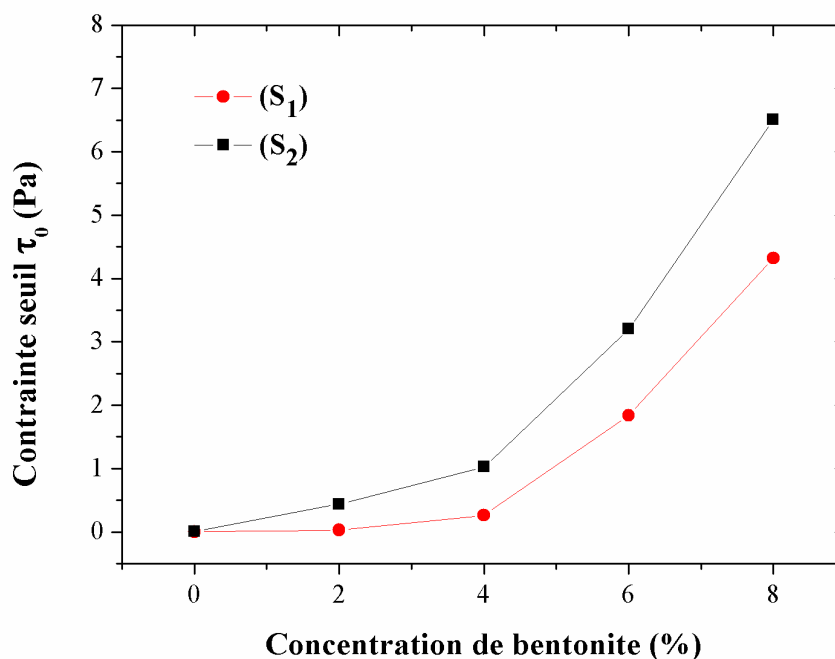


Figure VII.9. L'évolution de la contrainte seuil des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m = 30\%$) en fonction de la concentration de la bentonite

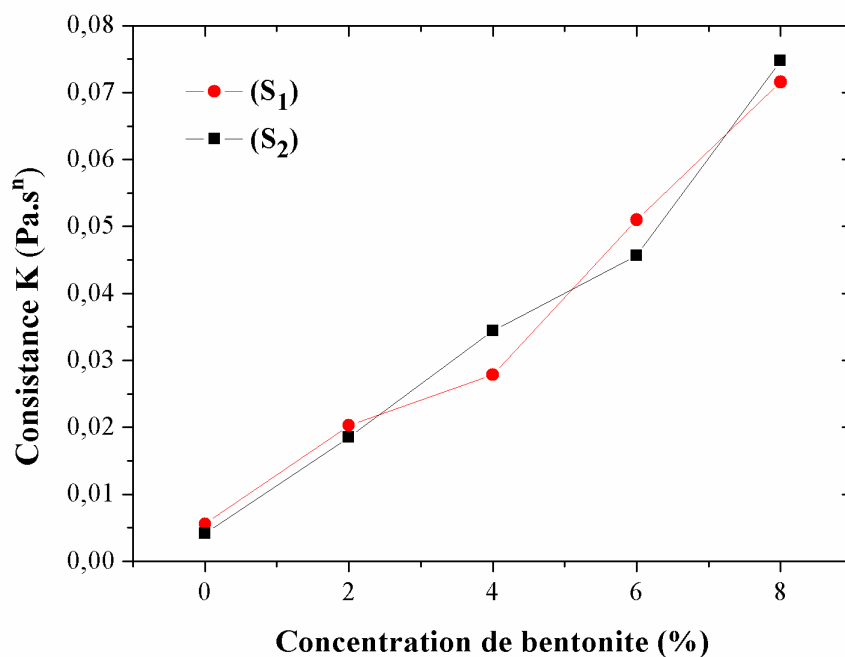


Figure VII.10. L'évolution de la consistance des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m = 30\%$) en fonction de la concentration de la bentonite

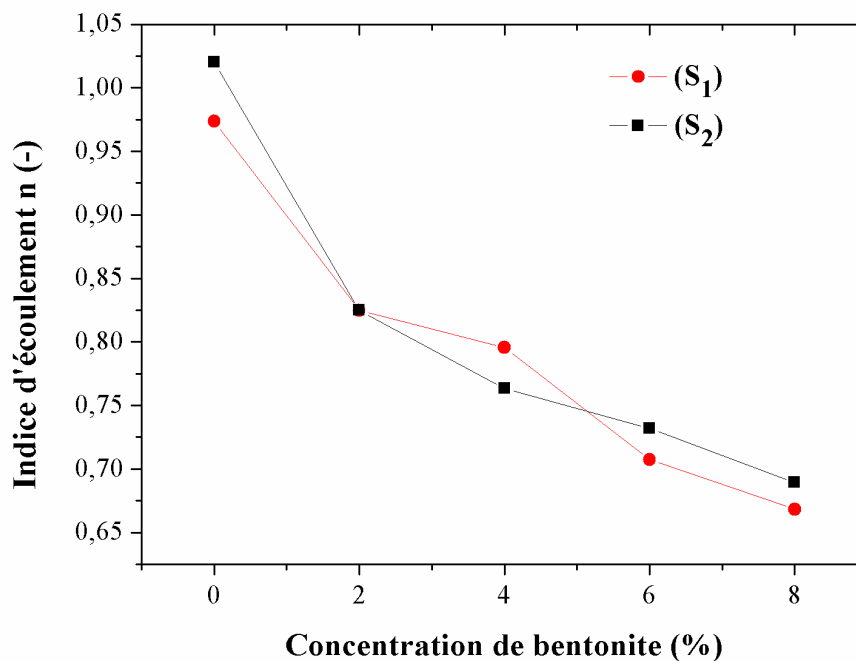


Figure VII.11. L'évolution de l'indice d'écoulement des suspensions (S_1) et (S_2) ($C_m = 30\%$) en fonction de la concentration de la bentonite

Les paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley sont également donnés dans les tableaux (VII.1) et (VII.2). Dans ces tableaux, on remarque une augmentation de la valeur du seuil d'écoulement et de l'indice de consistance avec l'augmentation de la teneur en bentonite. Une diminution de l'indice d'écoulement est également observée.

Tableau VII.1 Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concentration de la bentonite ajoutée à la suspension (S₁)

Concentration de bentonite (%)	Contrainte seuil τ_0 (Pa)	Consistance K (Pa. s ⁿ)	Indice d'écoulement n (-)	r ²
0	0.00162	0.00554	0.9736	0.999
2	0.02891	0.02031	0.8248	0.997
4	0.2613	0.02785	0.7955	0.999
6	1.837	0.05098	0.7073	0.996
8	4.322	0.07158	0.6682	0.995

Tableau VII.2 Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concentration de la chaux ajoutée à la suspension (S₂)

Concentration de chaux (%)	Contrainte seuil τ_0 (Pa)	Consistance K (Pa. s ⁿ)	Indice d'écoulement n (-)	r ²
0	0.00618	0.00413	1.02	0.999
2	0.439	0.01846	0.8248	0.999
4	1.023	0.03439	0.7635	0.998
6	3.2	0.04567	0.732	0.998
8	6.509	0.07472	0.6892	0.996

L'évolution des mêmes paramètres rhéologiques des deux suspensions mélangées avec de la chaux est représentée sur les figures (VII.12), (VII.13) et (VII.14). Les figures (VII.12) et (VII.13) montrent l'évolution du seuil d'écoulement et de l'indice de consistance des suspensions en fonction de la concentration de chaux ajoutée. En revanche, la figure (VII.14) représente également l'évolution de l'indice d'écoulement des deux suspensions.

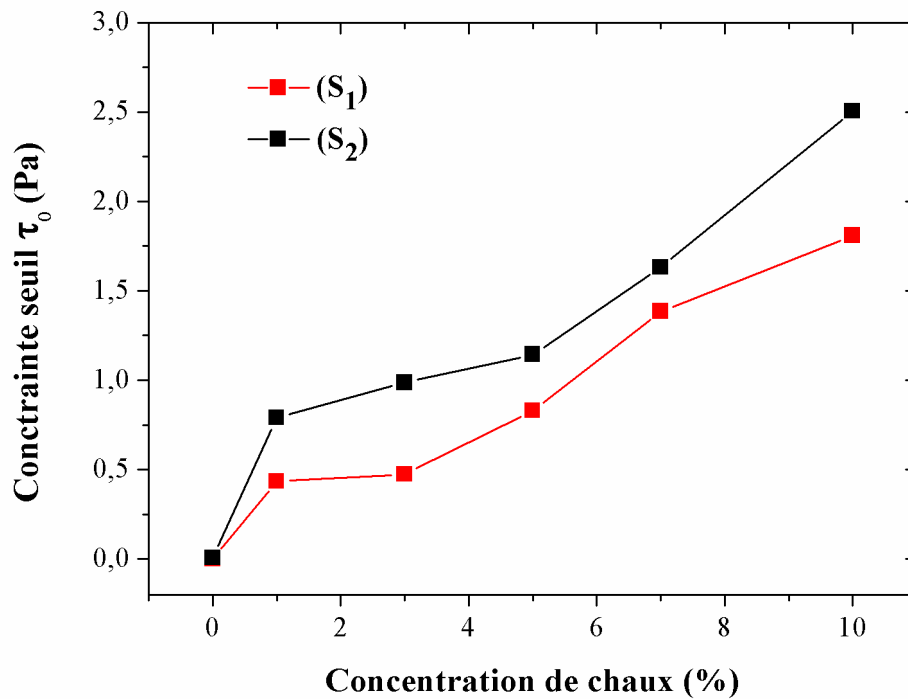


Figure VII.12. L'évolution de la contrainte seuil des suspensions (S₁) et (S₂) (C_m =30%) en fonction de la concentration de la chaux

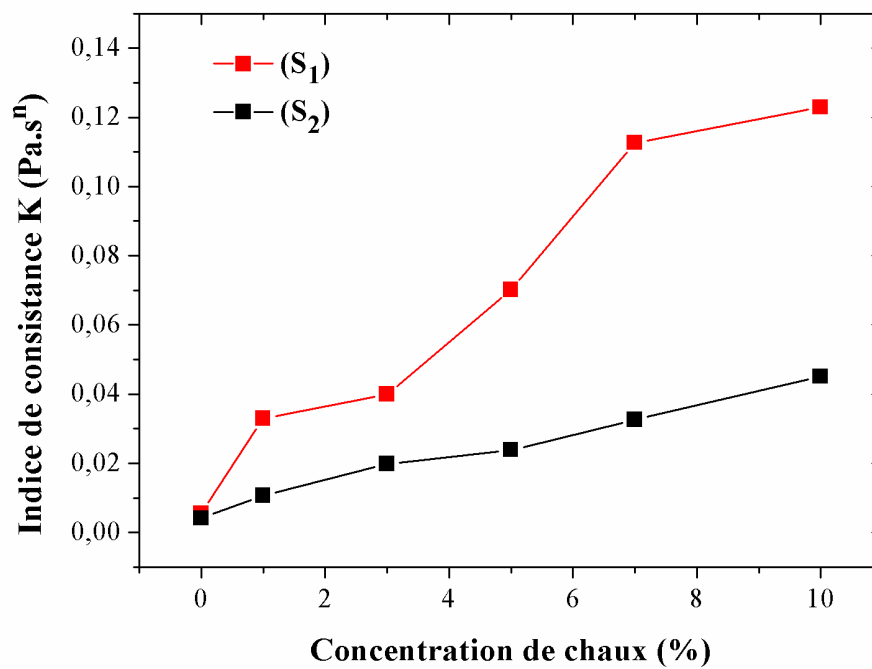


Figure VII.13. L'évolution de l'indice de consistance des suspensions (S₁) et (S₂) (C_m =30%) en fonction de la concentration de la chaux

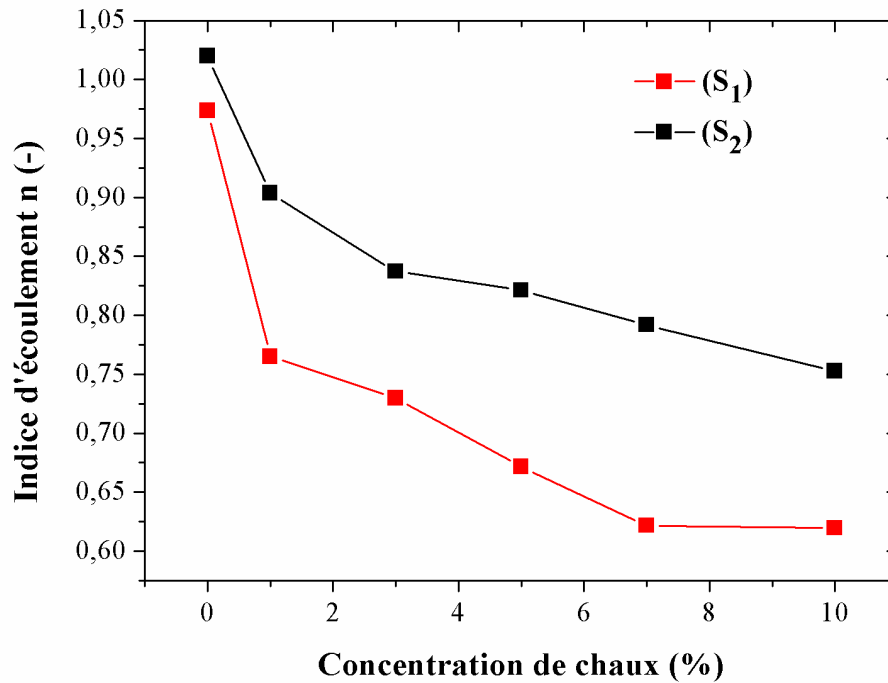


Figure VII.14. L'évolution de l'indice d'écoulement des suspensions (S₁) et (S₂) (C_m = 30%) en fonction de la concentration de la chaux

Les tableaux (VII.3) et (VII.4) regroupent les valeurs des paramètres (Contrainte seuil, consistance et indice d'écoulement). D'après les tableaux, les valeurs de la contrainte seuil et de l'indice de consistance augmentent en fonction de la concentration de la chaux. Toutefois, l'indice d'écoulement est diminué.

Tableau VII.3. Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concentration de la chaux ajoutée à la suspension (S₁)

Concentration de bentonite (%)	Contrainte seuil τ_0 (Pa)	Consistance K (Pa. s ⁿ)	Indice d'écoulement n (-)	r ²
0	0.00162	0.00554	0.9736	0.999
1	0.4337	0.0329	0.765	0.999
3	0.4736	0.03995	0.7297	0.997
5	0.8287	0.07017	0.6716	0.995
7	1.384	0.1126	0.6216	0.996
10	1.808	0.1229	0.6195	0.996

Tableau VII.4. Variation des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley en fonction de la concentration de la chaux ajoutée à la suspension (S_2)

Concentration de chaux (%)	Contrainte seuil τ_0 (Pa)	Consistance K (Pa. s ⁿ)	Indice d'écoulement n (-)	r^2
0	0.00618	0.00413	1.02	0.999
1	0.79	0.01061	0.9036	0.998
3	0.9864	0.01978	0.8373	0.998
5	1.143	0.02385	0.8213	0.998
7	1.631	0.03253	0.7918	0.997
10	2.504	0.04509	0.7526	0.997

À titre indicatif, le tableau (VII.5) fourni quelques données relatives aux taux d'accroissement du seuil d'écoulement et de la consistance des suspensions de base, sous l'effet de l'ajout de la bentonite et la chaux. Il ressort des résultats que l'ajout de 8 % de bentonite ou de chaux aux suspensions provoque des augmentations significatives des paramètres du modèle rhéologique (contrainte seuil, consistance) avec un taux d'accroissement compris entre 86 % et 99 %.

Tableau VII.5. Taux d'accroissement des paramètres d'Herschel-Bulkley des suspensions de base (S_1) et (S_2) en présence de 8% de bentonite et de chaux

	suspension (S ₁)					suspension (S ₂)				
	Suspension de base	Pourcentage d'additif				Suspension de base	Pourcentage d'additif			
		8% bentonite		8% chaux			8% bentonite		8% chaux	
		Valeur	Taux (%)	Value	Taux (%)		Valeur	Taux (%)	Valeur	Taux (%)
Contrainte seuil (Pa)	0.00162	4.322	90	1.452	99	0.00618	6.509	99	1.957	99
Consistance (Pa.s ⁿ)	0.006	0.06	99	0.108	94	0.004	0.07	94	0.029	86

Pour les deux suspensions (S_1) et (S_2), l'évolution des paramètres d'Herschel-Bulkley, en fonction des concentrations d'additifs (bentonite ou chaux), montre que la contrainte seuil d'écoulement et la consistance sont augmentées. La résistance des suspensions, à l'impact mécanique, se trouve ainsi renforcée. L'évolution de l'indice d'écoulement est marquée par une diminution significative en fonction de la concentration. L'augmentation des interactions inter-particules induites par les additifs peut expliquer ce phénomène. La consolidation développée par agglomération des particules modifie le comportement rhéologique et mécanique de la suspension. Le principal résultat de ce changement est le renforcement de la

cohésion inter-particulaire et l'amélioration de leur cimentation. L'augmentation de la contrainte seuil et de l'indice de consistance reflète le caractère de la cimentation induit par les additifs (Szegi et al. 2004 ; Karam 2006). Ce phénomène de la cimentation peut s'expliquer par l'hydratation, les interactions cationiques, la floculation et l'agglomération des particules (Fuenkajorn & Daemen 1996 ; Luckham & Rossi 1999; Wayal et al. 2012 ; El Mohtar et al. 2013).

Dans le cas du traitement à la bentonite, le phénomène de cohésion des suspensions observé lors des expériences peut s'expliquer ainsi par l'hydratation et la floculation des particules dues au gonflement de la bentonite (Saba et al. 2014 ; Gamal et al. 2019). La bentonite est généralement utilisée, notamment pour les sols à grains fins, comme un agent de liaison et un liant (Fuenkajorn et Daemen 1996). Luckham et Rossi (1999) suggèrent pour la stabilisation des matériaux l'utilisation de la bentonite comme un agent efficace de contrôle rhéologique.

Comme pour la bentonite, l'ajout de la chaux a produit la floculation et l'agglomération des particules d'argile. La capacité d'échange cationique, conduisant à la floculation et à l'agglomération des particules d'argile contenues dans le loess, est ainsi augmentée (Al-Mukhtar et al. 2012, Vitale et al. 2017, Dhar et Hussain 2019). Cela a modifié les propriétés rhéologiques des suspensions traitées. L'amélioration de cohésion se manifeste à travers l'augmentation des paramètres rhéologiques. Elle est justifiée par les réactions physico-chimiques entre les minéraux argileux contenus dans le loess et la chaux (Amadi et Okeiyi 2017; Vitale et al. 2017; Dhar et Hussain 2019). Bell (1996) et Vitale et al. (2017) ont rapporté que la floculation est due à la formation de ponts de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CaOH^+ entre les feuillets d'argile.

Dans les résultats du traitement à la chaux, l'influence des ions de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3) est remarquée. Les résultats ont montré que pour l'échantillon (S_1) où la teneur de ces ions est supérieure à celle de l'échantillon (S_2), la consistance a presque doublé (Tableau VII.5). La dissolution des ions de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3), en contact avec la chaux, a ainsi développé une réaction chimique. Cette réaction, appelée la réaction pouzzolanique, génère plus de produits de résistance. Ces produits sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H), d'aluminates de calcium hydraté (C-A-H), et d'alumino-silicates de calcium hydraté (C-A-S-H). Ces éléments renforcent les liaisons interparticulaires (Dash et Hussain 2012; Cherian et Arnepalli 2013; Al-Swaidani et al. 2016; Vitale et al. 2017).

Les résultats ont donc montré que l'addition progressive de la chaux s'accompagne d'une augmentation rapide puis progressive des valeurs de pH. Pour les concentrations explorées, la

valeur du pH des mélanges a atteint 12 (Figures (VI.13), (VI.14)). Le milieu devient ainsi favorable à la dissolution de silice et d'alumine des particules d'argile. Little (1999) a rapporté que la valeur critique pour provoquer une réaction pouzzolanique est un $\text{pH} > 10$. D'autres recherches suggèrent un $\text{pH} > 12$ (Dash et Hussain 2012; Al-Mukhtar et al. 2012). Les résultats de traitement du lœss à la bentonite et la chaux ont confirmé l'amélioration de la résistance mécanique des sols traités. Pour les deux échantillons explorés, le traitement à la bentonite présente un traitement préférable que l'ajout de la chaux. La bentonite améliore la résistance au cisaillement deux fois plus supérieure à celle de la chaux.

VII.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné l'influence de l'ajout de la bentonite et la chaux sur le comportement rhéologique des suspensions du lœss étudié. Le mode de préparation des échantillons ainsi que les protocoles expérimentaux sont soigneusement définis de manière à obtenir des résultats reproductibles.

Le modèle d'Herschel-Bulkley est choisi pour ajuster la dépendance de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour les concentrations d'additifs étudiées. Les fluides obtenus sont rhéo-fluidifiants et présentent un seuil d'écoulement.

À partir des résultats obtenus, une augmentation de la contrainte seuil et de la viscosité des suspensions est observée en fonction de l'augmentation de la concentration massique en bentonite et en chaux ajoutée. L'indice d'écoulement de différents mélanges a également diminué. Les résultats peuvent s'expliquer par la création d'interactions cimentaires entre les particules de mélanges. Ces interactions sont favorisées par l'hydratation, l'agglomération et la floculation inter-particules induites par les additifs.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de caractère essentiellement expérimental a été consacré à l'étude des propriétés physico-chimiques et rhéologiques du lœss de la région de Ghardaïa (Sud Algérien). L'influence de l'ajout de la bentonite et de la chaux, en termes d'augmentation de la résistance aux chocs mécanique et d'amélioration des performances contre l'effondrement du lœss est examinée.

Suite à une analyse bibliographique dédiée à l'étude du lœss à travers le monde, complété par des études de la rhéologie et examen des méthodes de traitement des propriétés du lœss, la littérature rapporte une synthèse qui représente une riche contribution pour le sujet.

La caractérisation géotechnique du lœss Algérien a permis une classification selon la région d'échantillonnage. L'étude comparative a indiqué que le lœss Algérien est comparable à ceux du lœss de nombreuses régions du monde, en particulier, au lœss du sud Tunisien. Les caractéristiques granulométriques du lœss Algérien et Tunisien révèlent sa similarité avec le lœss Tunisien. L'examen des propriétés de plasticités obtenues révèlent également la similarité à ceux du lœss de nombreuses régions du monde. Basé sur les caractéristiques de plasticité définies par Gibbs et Holland (1960), le lœss Algérien est classé en deux types : un lœss sableux pour l'échantillon (S_1) et limoneux pour l'échantillon (S_2).

Les résultats des tests physiques indiquent que l'ajout de la bentonite aux deux échantillons du lœss entraîne une augmentation de la fraction de particules fines et réduit la proportion de grosses particules. Ce changement dans la texture de l'échantillon a considérablement modifié les propriétés de plasticité. Ainsi, l'augmentation de la teneur en bentonite dans les mélanges a amélioré les limites de liquidité et de plasticité. Par conséquent, l'indice de plasticité est aussi augmenté.

En outre, l'effet de la chaux sur les propriétés physiques varie selon les échantillons examinés. En présence de la chaux, l'analyse granulométrique de l'échantillon (S_1) a montré une diminution des particules fines et une augmentation de la fraction de grosses particules. L'indice de plasticité a diminué progressivement. Toutefois, l'ajout de la chaux à l'échantillon (S_2) a entraîné une augmentation modérée de la fraction fine. La fraction de particules grossières est légèrement réduite. Pour l'échantillon (S_2), l'indice de plasticité a légèrement augmenté avec l'augmentation de la concentration de chaux, puis demeure stable à une concentration de 5 %. Cela est lié à la différence dans la composition, la qualité et la quantité des minéraux argileux présentés dans les deux échantillons du lœss.

À l'échelle de la microstructure, l'ajout de la bentonite et la chaux ont augmenté le pH et la conductivité électrique des échantillons. Dans le cas du traitement à la bentonite, l'augmentation des cations échangeables (Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}) et la capacité d'échange cationique peuvent justifier l'augmentation de ces paramètres. Pour le traitement à la chaux, l'augmentation du pH et les valeurs de CE est expliquée par la génération d'ions de calcium Ca^{2+} et d'hydroxyle (OH^-). Cette augmentation est le résultant de la dissolution de la chaux dans les pores de suspension du loess. Après 24 jours de durcissement, les valeurs de pH et CE des deux échantillons sont réduites. Cette diminution est due à la consommation de la chaux lors du développement de la réaction pouzzolanique.

Après avoir déterminé les conditions optimales de préparation, l'étude rhéologique est réalisée notamment à travers l'examen des courbes d'écoulement des suspensions du loess pour des concentrations massiques comprises entre 30 % et 55 %. Les échantillons sont également évalués à travers l'examen des paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley (contrainte seuil, l'indice de consistance et l'indice d'écoulement). L'analyse rhéologique a montré que les suspensions du loess présentent un comportement non Newtonien. L'évolution des paramètres d'Herschel-Bulkley à différentes concentrations indique une augmentation rapide de la contrainte seuil et de l'indice de consistance. En revanche, la valeur de l'indice d'écoulement a diminué.

La viscosité des suspensions du loess diminue en fonction de la vitesse de cisaillement. Pour des taux de cisaillement élevés, les suspensions deviennent plus fluides. En revanche, la viscosité augmente avec l'augmentation de la concentration du loess. Les suspensions du loess Algérien se caractérisent également par un caractère rhéofluidifiant. Les boucles d'hystérésis confirment le caractère thixotropique du comportement rhéologique des suspensions du loess Algérien.

Pour l'étude des mélanges "loess-bentonite" et "loess-chaux", les résultats d'analyse de l'ajout des additifs à la suspension de loess de base de 30 % révèlent une augmentation des propriétés rhéologiques telles que : la contrainte seuil, la viscosité apparente et la consistance. Ces propriétés atteignent des valeurs maximales à une concentration critique de 8 % d'additif. Toutefois, l'indice d'écoulement est diminué en fonction de l'augmentation de la concentration de l'additif. Ces résultats peuvent s'expliquer par la création d'interactions cimentaires entre les particules de mélanges. Ces interactions ont été favorisées par l'hydratation, l'agglomération et la floculation inter-particules, induites par la bentonite et la chaux.

À la fin de cette étude, les résultats ont conclu que l'ajout de la bentonite offre un meilleur traitement que la chaux. En effet, la bentonite a amélioré la résistance au cisaillement de la suspension du lœss deux fois plus supérieure que celle de la chaux.

L'ensemble des résultats ont fourni une base de données technique qui pourrait être utilisée pour toutes les questions d'utilisation du lœss dans la région explorée. Les indicateurs identifiés peuvent être utiles pour les problèmes techniques et économiques locaux, en particulier pour les travaux de construction.

Le présent travail possède des perspectives à long terme. Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse peuvent être considérés comme base d'une description approfondie des propriétés viscoélastiques du lœss étudié. Des essais rhéologiques associés à des analyses telles que la diffraction aux rayons X, microscopie électronique à balayage et des essais oedométriques présentent un sujet d'étude et d'investigation plus approfondie qui pourra compléter les conclusions de la présente thèse.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abu-Jdayil, B. (2003). Modelling the time-dependent rheological behavior of semisolid foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 97-102. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00277-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00277-7)
- Acevedo, N. I. A., Rocha, M., Bertolino, L. C. (2017). Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian southeast region for industrial applications. *Cerâmica*, 63, 253–262. <https://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633662045>
- Alercia, C., Pedro, A., Marcelo, E., & Gonzalo, A. M. (2015). Hydraulic conductivity in loessic stabilized soil. *International Journal of GEOMATE*, 9, 1510–1514. <https://doi.org/10.21660/2015.18.4158>
- Alghamdi, A.G., Aly, A. A., Al-Omran, A. M., & Alkhasha, A. (2018). Impact of biochar, bentonite, and compost on physical and chemical characteristics of a sandy soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 670. <https://dx.doi.org/10.1007/s12517-018-3939-y>
- Ali, N. (2016). *RhéoSpeggle: Un nouvel outil d'étude du comportement multi-échelle des matériaux hétérogènes* [Phd thesis, Université Grenoble Alpes]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01320125>
- Al-Mukhtar, M., Khattab, S., & Alcover, J.F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139–140, 17–27. <https://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>
- Al-Swaidani, A., Hammoud, I., & Meziab, A. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 714–725. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.04.002>
- Alvarez Solano, O. A. (2006). *Émulsions inverses très concentrées : Influence du procédé et de la formulation sur leurs propriétés rhéologiques* [These de doctorat, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL]. <http://www.theses.fr/2006INPL016N>
- Amadi, A. A. & Okeiyi, A. (2017). Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: Comparative analysis of laboratory data. *International Journal of Geo-Engineering*, 8, 3. <https://dx.doi.org/10.1186/s40703-017-0041-3>
- Amhadi, T. S., & Assaf, G. J. (2018). Overview of Soil Stabilization Methods in Road Construction. In S. El-Badawy & J. Valentin (Eds.), *Sustainable Solutions for Railways and Transportation Engineering* (pp. 21–33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01911-2_3
- Anagnosti, P. (1973). Storage dams founded on collapsing loess soils. *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mockba, pp7–11.
- Antoine, P. (2002). Les loess en France et dans le Nord-Ouest européen. *Revue Française de Géotechnique*, 99, 3–21. <https://doi.org/10.1051/geotech/2002099003>
- Arabi, M. & Wild, S. (1989). Property changes induced in clay soils when using lime stabilization. *Municipal Engineer*, 6. <https://trid.trb.org/view/307600>

- Assadi Langroudi, A. (2014). *Micromechanics of collapse in loess* [PhD Thesis, University of Birmingham]. <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/5284/>
- Assallay, A. M. (1998). *Structure and hydrocollapse behaviour of læss*. PhD Thesis, University of Loughborough.
/articles/thesis/Structure_and_hydrocollapse_behaviour_of_loess/9453560/1
- Assallay, A. M., Rogers, C. D. F., & Smalley, I. J. (1996). Engineering properties of loess in Libya. *Journal of Arid Environments*, 32(4), 373–386.
<https://doi.org/10.1006/jare.1996.0031>
- Assallay, A. M., Rogers, C. D. F., & Smalley, I. J. (1997). Formation and collapse of metastable particle packings and open structures in loess deposits. *Engineering Geology*, 48(1), 101–115. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)81916-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)81916-3)
- Azouz, K. B. (2010). *Relation entre propriétés rhéologiques et structure microscopique de dispersions de particules d'argile dans des dispersions de polymères* [Phd thesis, Université de Haute Alsace - Mulhouse]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00673467>
- Babu, N., & Poulose, E. (2018). Effect of lime on soil properties: a review, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5, 5.
- Badura, J., Jary, Z., & Smalley, I. (2013). Sources of loess material for deposits in Poland and parts of Central Europe: The lost Big River. *Quaternary International*, 296, 15–22.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.06.019>
- Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., & Cidade, M. T. (2019). Rheology of Natural Hydraulic Lime Grouts for Conservation of Stone Masonry—Influence of Compositional and Processing Parameters. *Fluids*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.3390/fluids4010013>
- Barnes, H. A. (1995). A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: Its cause, character, and cure. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 56(3), 221–251. [https://doi.org/10.1016/0377-0257\(94\)01282-M](https://doi.org/10.1016/0377-0257(94)01282-M)
- Barnes, H. A., Hutton, J. F., & Walters, K. (1989). *An Introduction to Rheology*. Elsevier.
- Barnes, H.A. (1999). The yield stress—a review or ‘panta roi’—everything flows?. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 81, 133–178.
- Baumgarten, W., & Peth, S. (2006). An approach to rheometry in soil mechanics—Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. *Soil and Tillage Research*, 91, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.007>
- Bell, F. G. (1992). *Engineering Properties of Soils and Rocks*. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, Ltd: Oxford,UK, 345.
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42, 223–237. [https://dx.doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://dx.doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2).
- Bell, F.G., De Bruyn, I.A. (1997). Sensitive, expansive, dispersive and collapsive soils. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 56,19–38.
- Bellil, S., Abbeche, K., & Bahloul, O. (2018). Treatment of a collapsible soil using a bentonite–cement mixture. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 40.
<https://dx.doi.org/10.2478/sgem-2018-0042>
- Benbelkacem-Benmouffok, G. (2009). *Viscoélasticité et écoulements de fluides structurés* [These de doctorat, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL].
<http://www.theses.fr/2009INPL012N>

- Benchabane, A. (2006). *Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles-polymères: Effets de l'ajout de polymères* [Thèse de doctorat, Université de Strasbourg]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4669.4486>
- Benedini, M., & Margaritora, G. (1974). Rhéologie des mélanges d'eau et d'argile. *Rheologica Acta*, 13(2), 289–295. <https://doi.org/10.1007/BF01520891>
- Benslimane, A. (2012). *Rhéologie et écoulement de fluides chargés: Application aux réseaux d'assainissement urbains: étude expérimentale et modélisation* [Thèse de doctorat, Université de Strasbourg]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00804350>
- Benyounes, K., Mellak, A., & Benchabane, A. (2010). The Effect of Carboxymethylcellulose and Xanthan on the Rheology of Bentonite Suspensions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(17), 1634–1643. <https://doi.org/10.1080/15567030902842244>
- Bessaim, M. M., Bessaim, A., Missoum, H., & Bendani, K. (2018). Effect of quick lime on physicochemical properties of clay soil. *MATEC Web of Conferences*, 149, 02065. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902065>
- Bettis, E. A., Muhs, D. R., Roberts, H. M., & Wintle, A. G. (2003). Last Glacial loess in the conterminous USA. In *Quaternary Science Reviews* (Vol. 22, Issues 18–19, p. 19071946). [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00169-0](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00169-0)
- Bird, R. B., Armstrong, R. C., & Hassager, O. (1987). Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1, 2nd Ed.: Fluid mechanics. <https://www.osti.gov/biblio/6164599-dynamics-polymeric-liquids-vol-ed-fluid-mechanics>
- Brunotte, E., Maurer, B., Fischer, P., Lomax, J., & Sander, H. (2009). A sequence of fluvial and aeolian deposits (desert loess) and palaeosoils covering the last 60ka in the Opuwo basin (Kaokoland/Kunene Region, Namibia) based on luminescence dating. *Quaternary International*, 1–2(196), 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.06.008>
- Bullard, J. E., McTainsh, G. H., & Pudmenzky, C. (2004). Aeolian abrasion and modes of fine particle production from natural red dune sands: An experimental study. *Sedimentology*, 51(5), 1103–1125. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2004.00662.x>
- Butler, B., & Hutton, J. (1956). Parna in the Riverine Plain of South-Eastern Australia and the Soils Thereon. *Australian Journal of Agricultural Research - AUST J AGR RES*, 7. <https://doi.org/10.1071/AR9560536>
- Butzer, K. W. (1965), *Environment and archeology*. Methuen, London, 524 p.
- Cabane, N. (2004). *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation* [Thesis, Saint-Etienne, EMSE]. <http://www.theses.fr/2004EMSE0028>
- Calik, U., & Sadoglu, E. (2014). Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite. *Geomechanics and Engineering*, 6(4), 403–418. <https://doi.org/10.12989/gae.2014.6.4.403>
- Callaghan, I. C., & Ottewill, R. H. (1974). Interparticle forces in montmorillonite gels. *Faraday Discussions of the Chemical Society*, 57(0), 110–118. <https://doi.org/10.1039/DC9745700110>

- Carmo, D. L. do, Lima, L. B. de, & Silva, C. A. (2016). Soil Fertility and Electrical Conductivity Affected by Organic Waste Rates and Nutrient Inputs. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 40. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150152>
- Catt, J. A. (1985). Soil particle size distribution and mineralogy as indicators of pedogenic and geomorphic history: Examples from the loessial soils of England and Wales. In S. Ellis, K. S. Richards, & R. R. Arnett (Eds.), *Geomorphology and soils* (pp. 202–218). George Allen & Unwin London. <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8q15y/soil-particle-size-distribution-and-mineralogy-as-indicators-of-pedogenic-and-geomorphic-history-examples-from-the-loessial-soils-of-england-and-wales>
- Catt, J. A. (1988). Loess—Its formation, transport and economic significance. Physical and chemical weathering in geochemical cycles. Eds A. Lerman & M. Meybeck. <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/86191/loess-its-formation-transport-and-economic-significance>
- Cazacu, G. B., & Draghici, G. (2019). The Geotechnical Properties, on Water Sensitive Soils, Loess. In W. Frikha, S. Kawamura, & W.-C. Liao (Eds.), *New Developments in Soil Characterization and Soil Stability* (pp. 23–31). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95756-2_3
- Chabane, F. (2009). *CONTRIBUTION A LA MODELISATION DE TRANSFERT DE CHALEUR LORS DU REMPLISSAGE D'UN MOULE*. [Thèse de Magister, Université de Batna 2].
- Chen, Z. H., Lin, Z. G., Huang, X. F., Shao, S. J., & Yang, D. Q. (2007). Loess from China. Taylor and Francis Group, London.
- Chen, H., Li, H., Fu, R., & Yuan, X. (2019). Dynamic behaviour and damage characteristics of loess in Xianyang, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01709-6>
- Cheng, D. C-H. (1980). Viscosity-concentration equations and flow curves for suspensions. *Chemistry and Industry*, 17, 403-406.
- Cheng, L.X. (1998). Experimental Study of Rheological Behavior of Heavy Oil Under Reservoir Conditions. Jiangnan Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Jiangnan, China. No.1998.029.
- Cherian, C. & Arnepalli, D. N. (2013). Role of lime diffusion in stabilization of fine grained soils: A critical review. *Fourth Indian Young Geotechnical Engineer's Conference*. Chennai, India.
- Ciobanu, Ștefan-Silvian. (2014). GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF LOESSOID SOILS AND IMPROVMENT METHODS. *Journal of Young Scientist*, II: 23-28.
- Costa, H. C. B., Arouca, F. O., Silva, D. O., & Vieira, L. G. M. (2018). Study of rheological properties of açai berry pulp: An analysis of its time-dependent behavior and the effect of temperature. *Journal of Biological Physics*, 44(4), 557–577. <https://doi.org/10.1007/s10867-018-9506-7>
- Coudé-Gaussen G. (1982). Les poussières éoliennes sahariennes : mise au point. *Revue Géomorphologique Dynamique*, 22(2), 49–70.

- Coudé-Gaussen, G. (1987). The Perisaharan Loess: Sedimentological Characterization and Paleoclimatical Significance. *GeoJournal*, 15 (2): 177–83. <https://doi.org/10.1007/BF00157945>
- Coudé-Gaussen, G. (1990). The loess and loess-like deposits along the sides of the western Mediterranean Sea: Genetic and palaeoclimatic significance. *Quaternary International*, 5, 1–8. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(90\)90020-5](https://doi.org/10.1016/1040-6182(90)90020-5)
- Coudé-Gaussen, G. (1991). *Les poussières sahariennes. Cycle sédimentaire et place dans les environnements et paléoenvironnements désertiques*. Édition John Libbey : Earotext, 485.
- Coudé-Gaussen, G., Le Coustumer, M.-N., & Rognon, P. (1984). Paléosols d'âge Pléistocène supérieur dans les loess des Matmata (Sud Tunisien) / Upper Pleistocene palaeosoils in the loess of Matmata (Southern Tunisia). *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 37(4), 359–386. <https://doi.org/10.3406/sgeol.1984.1679>
- Coude-Gaussen, G., Olive, P., & Rognon, P. (1983). Datation de dépôts loessiques et variations climatiques à la bordure nord du Sahara algéro-tunisien. *Revue de géologie dynamique et de géographie physique Paris*, 24(1), 61–73. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=12454232>
- Crouvi, O., Amit, R., Enzel, Y., & Gillespie, A. R. (2010). Active sand seas and the formation of desert loess. *Quaternary Science Reviews*, 29(17), 2087–2098. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.04.026>
- Darwiche, A. (2012). *Microrhéomètre sur puce pour l'étude de l'écoulement d'un liquide proche d'une surface liquide*. [Thèse de doctorat, Université de Bordeaux].
- Dash S. K. & Hussain M. (2012). Lime stabilization of soils: Reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 707–714. [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000431](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431)
- Daud, K. (2018). Cohesionless soil properties improvement using bentonite. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13, 271–275.
- Delvoie, S. (2017). *Caractérisation multiéchelle du loess de Hesbaye (Belgique) par une approche couplée géologique et géotechnique* [Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique]. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/217359>
- Deng, J., Wang, L.-M., & Zhang, Z.-Z. (2007). Microstructure characteristics and seismic subsidence of loess. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29, 542–548.
- Derbyshire, E. (1983). *On the morphology, sediments and origin of the Loess Plateau of Central China*. In: Gardner, R., Scoging, H. _Eds., *Megageomorphology*. Oxford Univ. Press, London, 172–194 p.
- Derbyshire, E., & Mellors, T. W. (1988). Geological and geotechnical characteristics of some loess and loessic soils from China and Britain: A comparison. *Engineering Geology*, 25(2), 135–175. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(88\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0013-7952(88)90024-5)
- Derbyshire, E., Meng, X., & Kemp, R. A. (1998). Provenance, transport and characteristics of modern aeolian dust in western Gansu Province, China, and interpretation of the Quaternary loess record. *Journal of Arid Environments*, 39(3), 497–516. <https://doi.org/10.1006/jare.1997.0369>

- Derkach, S. R. (2009). Rheology of emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 151(1), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.07.001>
- Dhar, S. & Hussain, M. (2019). The strength and microstructural behavior of lime stabilized subgrade soil in road construction. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1–13. <https://dx.doi.org/10.1080/19386362.2019.1598623>
- Dijkstra, T., & Smalley, I. J. (2012). *Genesis and Properties of Collapsible Soils*. Springer Science & Business Media.
- Dodonov, A. E. (1984). *Stratigraphy and correlation of Upper Pliocene-Quaternary deposits of Central Asia*. In: M. Pecs (Editor), *Lithology and Stratigraphy of Loess and Paleosols*. Geographical Research Institute, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, pp. 201-211.
- Dodonov, A. E. (1991). Loess of Central Asia. *GeoJournal*, 24(2), 185–194. <https://doi.org/10.1007/BF00186015>
- Duan, Z., & Peng, J. (2016). An Experimental Study on Creep Characteristics of Q2 Loess in the Guanzhong Area of China. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, (iceta). <https://doi.org/10.12783/dtetr/iceta2016/7101>
- Dullaert, K., & Mewis, J. (2005). Thixotropy: Build-up and breakdown curves during flow. *Journal of Rheology*, 49(6), 1213-1230. <https://doi.org/10.1122/1.2039868>
- Durand, J. H. (1983). *Les sols irrigables; étude pédologique*. Presses Universitaire de France. Agence de Coopération Culturelle et Technique, 338p. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015015607>
- Eden, D. N., & Hammond, A. P. (2003). Dust accumulation in the New Zealand region since the last glacial maximum. *Quaternary Science Reviews*, 22(18), 2037–2052. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00168-9](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00168-9)
- El Howayek, A., Huang, P., Bisnett, R., & Santagata, M.C. (2011). Identification and behavior of collapsible soils. Publication FHWA/IN/JTRP-2011/12. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette. <https://doi.org/10.5703/1288284314625>
- El Kissi, N., Nigen, S., & Pignon, F. (2006). Glissement et Rhéométrie. *Rhéologie*, 10, 13–39.
- El Mohtar C. S., Bobet, A., Santagata, M. C., Drnevich, V. P., & Johnston, C. T. (2013). Liquefaction mitigation using bentonite suspensions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139, 1369–1380. [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000865](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000865).
- El-Badawy, S., & Valentin, J. (2018). *Sustainable Solutions for Railways and Transportation Engineering: Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures, Egypt 2018 – The Official International Congress of the Soil-Structure Interaction Group in Egypt (SSIGE)*. Springer.
- Elgamouz, A., Tijani, N., Shehadi, I., Hasan, K., & Kawam, M. (2019). Characterization of the firing behaviour of an illite-kaolinite clay mineral and its potential use as membrane support. *Heliyon*, 5, e02281. <https://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02281>
- Elmashad, M. M. A. (2018). Improving the geotechnical behavior of sand through cohesive admixtures. *Water Science*, 32, 67–78. <https://dx.doi.org/10.1016/j.wsj.2018.03.001>

- Enzel, Y., Amit, R., Crouvi, O., & Porat, N. (2010). Abrasion-derived sediments under intensified winds at the latest Pleistocene leading edge of the advancing Sinai–Negev erg. *Quaternary Research*, 74(1), 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.04.002>
- Erol, O. A., & El-Ruwaih, I. A. (1982). Collapse behaviour of desert loess. *Proceedings of the 6th Congress International Association of Engineering Geology*, New Delhi, I: 443–448.
- Estellé, P., Michon, C., Lanos, C., & Grossiord, J. L. (2013). De l’interêt d’une caractérisation rhéologique empirique et relative (chapitre 7). In C. par J.-L. G. et A. P. Groupe Français de Rhéologie (GFR) (Ed.), *La mesure en rhéologie—Des avancées récentes aux perspectives* (Vol. 1, pp. 205–243). EDP Sciences. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00911980>
- Evstatiev, D. (1988). Loess improvement methods. *Engineering Geology*, 25(2), 341–366. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(88\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0013-7952(88)90036-1)
- Fall, A. (2008). *RHEOPHYSIQUE DES FLUIDES COMPLEXES: ECOULEMENT ET BLOCAGE DE SUSPENSIONS* [Phd thesis, Université Paris-Diderot - Paris VII]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00322449>
- Feys, D., Cepuritis, R., Jacobsen, S., Lesage, K., Secrieru, E., & Yahia, A. (2017). Measuring Rheological Properties of Cement Pastes: Most common Techniques, Procedures and Challenges. *RILEM Technical Letters*, 2, 129–135. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2017.43>
- Firoozfar, A., & Dousti, M. (2019). Kerman collapsible clay amendment by lime, bentonite, and nano silica. *Magazine of Civil Engineering*, 90(6), 119–129. <https://doi.org/10.18720/MCE.90.11>
- Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Fuenkajorn, K., & Daemen, J. J. (1996). Sealing of boreholes and underground excavations. In: *Rock*. Springer, The Netherlands. <https://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-1505-3>.
- Gamal, H., Elkatatny, S., Basfar, S., & Al-Majed, A. (2019). Effect of pH on rheological and filtration properties of water-based drilling fluid based on bentonite. *Sustainability*, 11, 6714. <https://dx.doi.org/10.3390/su11236714>.
- Gao, Y., Qian, H., Li, X., Chen, J., & Jia, H. (2018). Effects of lime treatment on the hydraulic conductivity and microstructure of loess. *Environmental Earth Sciences*, 77(14), 529. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7715-9>
- Garcia Giménez, R., Vigil de la Villa, R., & González Martín, J. A. (2012). Characterization of loess in central Spain: A microstructural study. *Environmental Earth Sciences*, 65(7), 2125–2137. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1193-7>
- Ghafarpour, A., Khormali, F., Balsam, W., Karimi, A., & Ayoubi, S. (2016). Climatic interpretation of loess-paleosol sequences at Mobarakabad and Aghband, Northern Iran. *Quaternary Research*, 86, 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2016.05.004>
- Ghannam, M. T., Selim, M. Y. E., Zekri, A. Y., & Esmail, N. (2019). Flow characteristics of xanthan solutions and their crude oil emulsions in terms of thixotropic behavior.

- Petroleum Science and Technology*, 37(11), 1279–1288.
<https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1566363>
- Ghobadi, M. H., Abdilor, Y., & Babazadeh, R. (2014). Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 611–619. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0563-7>
- Gibbs, H. J., & Holland, W. Y. (1960). *Petrographic and Engineering Properties of Loess*. Technical Information Branch, Denver Federal Center.
- Gibbs, H., & Bara, J. (1962). Predicting Surface Subsidence from Basic Soil Tests. *Field Testing of Soils*. <https://doi.org/10.1520/STP47043S>
- Gibouin, F. (2015). *Application de méthodes optiques couplées à l'étude d'écoulements de fluides biréfringents* [Phd thesis, Université de Poitiers]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01281739>
- Gnambo, S. (2015). *Simulation des grandes échelles des transferts thermo-convectifs dans les écoulements turbulents d'un fluide non-Newtonien en conduite cylindrique* [Phd thesis, Université Paris-Est]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01288456>
- Goudie, A. S., Parker, A. G., Bull, P. A., White, K., & Al-Farraj, A. (2000). Desert loess in Ras Al Khaimah, United Arab Emirates. *Journal of Arid Environments*, 46(2), 123–135. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0663>
- Grabowska-Olszewska, B. (1988). Engineering-geological problems of loess in Poland. *Engineering Geology*, 25(2), 177–199. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(88\)90025-7](https://doi.org/10.1016/0013-7952(88)90025-7)
- Greene, R., Cattle, S., & McPherson, A. (2009). Role of eolian dust deposits in landscape development and soil degradation in southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 56, S55–S65. <https://doi.org/10.1080/08120090902871101>
- Grim, R., & Guven, N. (1978). *Bentonite: Geology, Mineralogy, Properties, and Uses*. New York: Elsevier Science Publishing.
- Grousset, F. E., Rognon, P., Coudé-Gaussen, G., & Pédemay, P. (1992). Origins of peri-Saharan dust deposits traced by their Nd and Sr isotopic composition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 93(3), 203–212. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(92\)90097-O](https://doi.org/10.1016/0031-0182(92)90097-O)
- Guazzelli, E. (2001). *Rhéologie des fluides complexes*. École d'ingénieur. Rhéologie des fluides complexes, France.
- Guo, Y., Nishimura, T., Suzuki, S., & Kato, M. (2003). Rheological aspect of the collapse settlement property of the loess. *Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, 2003(225), 311–318. <https://doi.org/10.11408/jsidre1965.2003.311>
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., Wu, H. B., Qiao, Y. S., Zhu, R. X., Peng, S. Z., Wei, J. J., Yuan, B. Y., & Liu, T. S. (2002). Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416(6877), 159–163. <https://doi.org/10.1038/416159a>
- Guy, C., Jean-Louis, G., & Nicolas, H. (2014). *Initiation à la rhéologie (4^e Éd.): Bases théoriques et applications expérimentales*. Lavoisier.
- Haberlah, D., Williams, M. A. J., Halverson, G., McTainsh, G. H., Hill, S. M., Hrstka, T., Jaime, P., Butcher, A. R., & Glasby, P. (2010). Loess and floods: High-resolution

- multi-proxy data of Last Glacial Maximum (LGM) slackwater deposition in the Flinders Ranges, semi-arid South Australia. *Quaternary Science Reviews*, 29(19), 2673–2693. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.04.014>
- Haeri, S. M. (2016). Hydro-mechanical behavior of collapsible soils in unsaturated soil mechanics context. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(1), 25–40. <https://doi.org/10.3208/jgssp.KL-3>
- Haeri, S. M., Hosseini, A., Shahrabi, M. M., & Soleymani, S. (2015). *Evaluation and comparison of strength characteristics of Gorgan Loessial soil improved with Nano-Silica, Lime and Portland Cement*. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-603-3-1820>
- Hassan, A.Z.A., & Mahmoud, A. W. (2013). The Combined Effect of Bentonite and Natural Zeolite on Sandy Soil Properties and Productivity of Some Crops. *Topclass Journal of Agricultural Research*, 1(3), 22-28
- Hesse, P. P., & McTainsh, G. H. (2003). Australian dust deposits: Modern processes and the Quaternary record. *Quaternary Science Reviews*, 22(18), 2007–2035. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00164-1](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00164-1)
- Hicher, P., Wahyudi, H., & Tessier, D. (2000). Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials - MECH COHESIVE-FRICT MATER*, 5, 341–371. [https://doi.org/10.1002/1099-1484\(200007\)5:53.3.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1099-1484(200007)5:53.3.CO;2-3)
- Holtz, W., & Gibbs, H. (1951). Consolidation and Related Properties of Loessial Soils. *Symposium on Consolidation Testing of Soils*. <https://doi.org/10.1520/STP48293S>
- Hosseini, S. E., Alizadeh, M. K., & Mesbah, A. (2012). Evaluation of Shear Strength Parameters of Amended Loess through Using Common Admixtures in Gorgan, Iran. *International Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(12), 1055-1058.
- Houston, S. L., Houston, W. N., Zapata, C. E., & Lawrence, C. (2001). Geotechnical engineering practice for collapsible soils. *Geotechnical & Geological Engineering*, 19(3), 333–355. <https://doi.org/10.1023/A:1013178226615>
- Jarny, S. (2004). Thixotropie des pâtes cimentaires [Phd thesis, Ecole des Ponts ParisTech]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00011192>
- Jawad, T. A. (2009). Improvement Of Sandy Soil Properties By Using Bentonite. *Kufa Journal of Engineering*, 1(1), Article 1. <http://journals.uokufa.edu.iq/index.php/kje/article/view/2574>
- Jean-Luc, C. (2013). *Conception des pièces plastiques injectées*. Lavoisier.
- Jefferson, I., Rogers, C., Evstatiev, D., & Karastanev, D. (2005). Chapter 25 Treatment of metastable loess soils : Lessons from Eastern Europe. In B. Indraratna & J. Chu (Éds.), *Elsevier Geo-Engineering Book Series* (Vol. 3, p. 723-762). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1571-9960\(05\)80028-X](https://doi.org/10.1016/S1571-9960(05)80028-X)
- Jennings, J.E., & Knight, K. (1957). The additional settlement of foundation due to collapse of sandy soils on wetting. *Proc. 4th ICSMFE*, 1 : p 316-319.
- Jia, L., Zhang, L., Guo, J., Yao, K., Lim, S. M., Li, B., & Xu, H. (2019). Evaluation on Strength Properties of Lime–Slag Stabilized Loess as Pavement Base Material. *Sustainability*, 11(15), 4099. <https://doi.org/10.3390/su11154099>

- Jing, L. (1989). *Strength characteristics of unsaturated Palouse loess*. [Ph. D. Thesis, University of Idaho, 252p].
- Jowett, T. W. D. (1995). An investigation of the geotechnical properties of loess from Canterbury and Marlborough. [PhD thesis, University of Canterbury] <https://doi.org/10.26021/6387>
- Kalantari, B. (2013). Foundations on collapsible soils: A review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Forensic Engineering*, 166(2), 57–63. <https://doi.org/10.1680/feng.12.00016>
- Karam, J. P. (2006). Etude de la rhéologie des loess du Nord de la France - Application à l'évaluation de leur risque de liquéfaction. PhD thesis, Ecole des Ponts Paris, France. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002185>.
- Karimi, A., Khademi, H., Kehl, M., & Jalalian, A. (2009). Distribution, lithology and provenance of peridesert loess deposits in northeastern Iran. *Geoderma*, 148(3), 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.10.008>
- Kaufhold, S., Dohrmann, R., Koch, D., & Houben, G. (2008). The pH of aqueous bentonite suspensions. *Clays and Clay Minerals*, 56, 338–343. <https://dx.doi.org/10.1346/CCMN.2008.0560304>
- Kazemian, S. (2010). *Rheological behavior of grout in context of Newtonian and non-Newtonian fluid*. *EGJE*, 15, 1103–115.
- Kelessidis, V. C., & Maglione, R. (2008). Shear Rate Corrections for Herschel-Bulkley Fluids in Couette Geometry. *Applied Rheology*, 18(3), 34482–1–34482–11. <https://doi.org/10.1515/arh-2008-0010>
- Khaidapova, D., Milanovskiy, E., & Shein, E. (2015). Rheological properties of different minerals and clay soils. *Eurasian Journal of Soil Science*, 4, 198–202. <https://doi.org/10.18393/ejss.2015.3.198-202>
- Khattab, A., & Adrees, S. (2002). *Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux* [Thesis, Orléans]. <http://www.theses.fr/2002ORLE2028>
- Khelfallah, M. (2007). Caractérisation de l'écoulement d'un fluide Binghamien dans une conduite cylindrique. Mémoire de Magister. Université d'Oran. <http://repository.usthb.dz/bitstream/handle/123456789/3927/TH4744.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Khelifi, S. (2018). *Étude du comportement hydrodynamique de suspensions concentrées de particules d'hématite: Sédimentation, comportement rhéologique et écoulement forcé dans une cellule inclinée*. [Thèse de doctorat, Université de Lorraine].
- Kirchenheimer, F. (1969). Heidelberg und der Löss. 'Ruperto-Carola' Z. Verein. Freunde Student. Univ. Heidelberg XXI fahr. 46, 3–7.
- Kwak, M.-S., Ahn, H.-J., & Song, K.-W. (2015). Rheological investigation of body cream and body lotion in actual application conditions. *Korea-Australia Rheology Journal*, 27(3), 241–251. <https://doi.org/10.1007/s13367-015-0024-x>
- LCPC, SETRA. (1992). Réalisation des remblais et des couches de forme. *Guide des Terrassements Routiers (GTR)*, Paris, Fascicules I et II.

- Li, P., Vanapalli, S., & Li, T. (2016). Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(2), 256–274. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.002>
- Li, Y. (2015). Rheological model of loess and its application to excavation of pit. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20, 1869–1876.
- Li, Y., Shi, W., Aydin, A., Beroya-Eitner, M. A., & Gao, G. (2020). Loess genesis and worldwide distribution. *Earth-Science Reviews*, 201, 102947. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102947>
- Li, Z., He, Y., Wei, M., & Shi, J. (2019). Shear Strength Characteristics of Loess Reinforced with Tire Derived Aggregate. 177–180. <https://doi.org/10.2991/ice2me-19.2019.40>
- Lima, A. T., Gustav Loch, J. P., & Kleingeld P. J. (2010). Bentonite electrical conductivity: A model based on series–parallel transport. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40, 1061–1068. <https://dx.doi.org/10.1007/s10800-009-0060-7>
- Lin, Z. (1995). Variation in Collapsibility and Strength of Loess with Age. In E. Derbyshire, T. Dijkstra, & I. J. Smalley (Éds.), *Genesis and Properties of Collapsible Soils* (p. 247–265). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0097-7_13
- Lin, Z., & Liang, W. (1982). Engineering properties and zoning of loess and loess-like soils in China. *Canadian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1139/t82-007>
- Little, D. N. (1999). *Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates*. Prepared for the National Lime Association: Arlington, Virginia, USA.
- Liu, C.-Q., Masuda, A., Okada, A., Yabuki, S., Zhang, J., & Fan, Z.-L. (1993). A geochemical study of loess and desert sand in northern China: Implications for continental crust weathering and composition. *Chemical Geology*, 106, 359–374. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90037-J](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90037-J)
- Liu, X., Zhang, M., Zhang, H., Jia, Y., Zhu, C., & Shan, H. (2017). Physical and mechanical properties of loess discharged from the Yellow River into the Bohai Sea, China. *Engineering Geology*, 227, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.019>
- Liu, Y.-S., Bai, Q., & Nie, Y. (2004). *Properties of Bentonite Enhanced Loess and Laterite*. Undefined. /paper/Properties-of-Bentonite-Enhanced-Loess-and-Laterite-Liu-Bai/ea0776bc9fffd710cc8b88f9e051cdfbd9eddab4
- Locat, J., Bérubé, M.-A., & Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: Shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), 294–304. <https://doi.org/10.1139/t90-040>
- Luckham, P. F. & Rossi, S. (1999). The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 82, 43–92. [https://dx.doi.org/10.1016/S0001-8686\(99\)00005-6](https://dx.doi.org/10.1016/S0001-8686(99)00005-6).
- Lyell, C. (1834). *Observations on the loamy deposit called loess of the Basin of the Rhine*. Edinburgh New Philosophical Jour, 17, 110–120.
- M'Timet, A. (1992). Les loess sahariens et l'amélioration de leurs propriétés géotechniques: Cas des Matmata et de leurs bordures, Tunisie. In E. Le Floch, M. Grouzis, A. Cornet, & J.-C. Bille (Eds.), *L'aridité: Une contrainte au développement: Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés* (Centre IRD de Bondy; pp. 387–400). ORSTOM. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:37368>

- Maciel, G. de F., Santos, H. K. dos, & Ferreira, F. de O. (2009). Rheological analysis of water clay compositions in order to investigate mudflows developing in canals. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 31(1), 64–74. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782009000100010>
- Malfoy, C., Pantet, A., Monnet, P., & Righi, D. (2003). Effects of the Nature of the Exchangeable Cation and Clay Concentration on the Rheological Properties of Smectite Suspensions. *Clays and Clay Minerals*, 51(6), 656 – 663. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2003.0510608>
- Markgraf, W. (2006). *Microstructural Changes in Soils Rheological Investigations in Soil Mechanics*. Inst. für Pflanzenernährung und Bodenkunde
- Markgraf, W., Watts, C. W., Whalley, W. R., Hrkac, T., & Horn, R. (2012). Influence of organic matter on rheological properties of soil. *Applied Clay Science*, 64, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.009>
- Marschalko, M., Yilmaz, I., Fojtova, L., Lamich, D., & Bednarik, M. (2013). Properties of the Loess Sediments in Ostrava Region (Czech Republic) and Comparison with Some Other Loess Sediments [Research Article]. *The Scientific World Journal*. <https://doi.org/10.1155/2013/529431>
- Maurya, N. K., & Mandal, A. (2016). Studies on behavior of suspension of silica nanoparticle in aqueous polyacrylamide solution for application in enhanced oil recovery. *Petroleum Science and Technology*, 34(5), 429–436. <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1145693>
- McCraw, J.D. (1975) Quaternary airfall deposits of New Zealand. In: Suggate RP, Cresswell MM (eds) Quaternary studies, vol 13. Bulletin of Royal Society of New Zealand, Wellington, pp 35–44.
- McTainsh, G. (1987). Desert loess in northern Nigeria. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 31(2), 145–165.
- Mewis, J., & Wagner, N. J. (2009). Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*, 147–148, 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.005>
- Miao, T., & Wang, Z. (1990). The deformation mechanism of collapsible loess based on instability of microstructure. *Science in China, Ser. B*, 86–96.
- Moll, L. L., Rocca, R. J., & Terzariol, R. E. (1989). *Loess soils: Engineering practice in Argentina*. 283–288. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6939026>
- Molloy, L. (1988). *Soils in the New Zealand Landscape: The Living Mantle*. Mallinson Rendel.
- Moreno, R. (2001). Rheology. In K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, & P. Veyssi re (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 8192–8196). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01468-6>
- Muhs, D. R. (2014). Origins and Properties of Quaternary Loess Deposits☆. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09431-8>

- Muhs, D. R. (2018). The geochemistry of loess: Asian and North American deposits compared. *Journal of Asian Earth Sciences*, 155, 81–115. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.10.032>
- Muhs, Daniel R., & Bettis, A. E. (2003). *Quaternary loess-Paleosol sequences as examples of climate-driven sedimentary extremes*. 53–74. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2370-1.53>
- Muhs, Daniel R., & Zárte, M. (2001). Chapter 12—Late Quaternary Eolian Records of the Americas and Their Paleoclimatic Significance. In V. Markgraf (Ed.), *Interhemispheric Climate Linkages* (pp. 183–216). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012472670-3/50015-X>
- Muhs, Daniel R., Cattle, S. R., Crouvi, O., Rousseau, D.-D., Sun, J., & Zárte, M. A. (2014). Loess Records. In P. Knippertz & J.-B. W. Stuut (Eds.), *Mineral Dust: A Key Player in the Earth System* (pp. 411–441). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3_16
- Muhs, Daniel R., Iii, E. A. B., Roberts, H. M., Harlan, S. S., Paces, J. B., & Reynolds, R. L. (2013). Chronology and provenance of last-glacial (Peoria) loess in western Iowa and paleoclimatic implications. *Quaternary Research*, 80(3), 468–481. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.06.006>
- Mukandila, E. M., Loots, H., & Dlamini, P. (2015). *Principle of dynamic shear rheometer testing of non-standard samples for cohesion and adhesion of bituminous road seal materials*. Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA15), 11th, 2015, Sun City, South Africa. <https://trid.trb.org/view/1404867>
- Nawazish Ali Shah. (2008). *Ideal fluid dynamics : For scientists and engineers*. A-One publisher.
- Nehdi, M., & Rahman, M.-A. (2004). Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 1993 - 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.020>
- Nettleton, W. D., & Chadwick, O. A. (1996). Late Quaternary, redeposited loess-soil developmental sequences, South Yemen. *Geoderma*, 70(1), 21–36. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00063-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00063-1)
- Ochowiak, M., Broniarz-Press, L., & Rozanski, J. (2012). Rheology and Structure of Emulsions and Suspensions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 33(2), 177 -184. <https://doi.org/10.1080/01932691.2010.548694>
- Parsons, R. L., Johnson, R. M., Brown, D. A., Dapp, S., & Brennan, J. J. (2009). Characterization of Loess for Deep Foundations. *DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute*, 3(2), 14–24. <https://doi.org/10.1179/dfi.2009.008>
- Paumier, S. (2007). FACTEURS DETERMINANT L'ORGANISATION ET LA RHEOLOGIE DU SYSTEME ARGILE-EAU POUR DES SUSPENSIONS DE SMECTITES. [Phd thesis, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00263559>
- Pécsi, M. (1968). *Loess*. In: *Geomorphology*. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_233

- Pécsi, M. (1990). Loess is not just the accumulation of dust. *Quaternary International*, 7–8, 1–21. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(90\)90034-2](https://doi.org/10.1016/1040-6182(90)90034-2)
- Pei, X., Zhang, F., Wu, W., & Liang, S. (2015). Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles. *Applied Clay Science*, 114, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.007>
- Pévère, A. (2006). *Apport des mesures rhéologiques à l'étude des biomasses épuratoires granulaires anaérobies = Rheological measurements to study the anaerobic granular sludges* [Limoges]. <http://aurore.unilim.fr/ori-oai-search/notice/view/unilim-ori-17813>
- Phan-Thien, N., & Mai-Duy, N. (2017). *Understanding Viscoelasticity: An Introduction to Rheology* (3^e éd.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62000-8>
- Phillips, C. J. & Davies, T. R. H. (1991). Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology*, 4, 101–110. [https://dx.doi.org/10.1016/0169-555X\(91\)90022-3](https://dx.doi.org/10.1016/0169-555X(91)90022-3).
- Phoak, S., Luo, Y.-S., Li, S.-N., & Yin, Q. (2018). Influence of Submergence on Stabilization of Loess in Shaanxi Province by Adding Fly Ash. *Applied Sciences*, 9(1), 68. <https://doi.org/10.3390/app9010068>
- Pye, K. (1984). “Loess”. *Progress in physical geography*, 8(2), 176–217. <https://doi.org/10.1177/030913338400800202>
- Pye, K. (1987). *Aeolian dust and dust deposits*. Academic Press Inc. London Ltd: England, 334p.
- Pye, K., & Zhou, L.-P. (1989). Late Pleistocene and Holocene aeolian dust deposition in North China and the Northwest Pacific Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 73(1), 11–23. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(89\)90041-2](https://doi.org/10.1016/0031-0182(89)90041-2)
- Qiang, X., An, Z., Song, Y., Chang, H., Sun, Y., Liu, W., Ao, H., Dong, J., Fu, C., Wu, F., Lu, F., Cai, Y., Zhou, W., Cao, J., Xu, X., & Ai, L. (2011). New eolian red clay sequence on the western Chinese Loess Plateau linked to onset of Asian desertification about 25 Ma ago. *Science China Earth Sciences*, 54(1), 136–144. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4126-5>
- Quemada, D. (1977). Rheology of concentrated disperse systems and minimum energy dissipation principle. *Rheologica Acta*, 16(1), 82–94. <https://doi.org/10.1007/BF01516932>
- Quemada, D. (1978). Rheology of concentrated disperse systems II. A model for non-newtonian shear viscosity in steady flows. *Rheologica Acta*, 17(6), 632–642. <https://doi.org/10.1007/BF01522036>
- Rao, S. M., & Shivananda, P. (2005). Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions. *Geotechnical & Geological Engineering*, 23(1), 79. <https://doi.org/10.1007/s10706-003-3157-5>
- Rezaei, H., Lashkaripour, G. R., & Ghafoori, M. (2011). Engineering Geology Criteria for Evaluation and Classification of Loess in Golestan Province. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 12. <http://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1024627.html>
- Rigal, C. (2012). *Comportement de fluides complexes sous écoulement: Approche expérimentale par résonance magnétique nucléaire et techniques optiques et simulations numériques*. [Thèse de doctorat, Université de Lorraine].

- Roberts, H. M., Muhs, D. R., & Iii, E. A. B. (2007). *Loess records: North America*. 1456–1466. <https://doi.org/10.1016/B0-44-452747-8/00163-0>
- Rogers, C. D. F. (1995). Types and Distribution of Collapsible Soils. In E. Derbyshire, T. Dijkstra, & I. J. Smalley (Éds.), *Genesis and Properties of Collapsible Soils* (p. 1-17). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0097-7_1
- Rogers, C. D. F., Dijkstra, T. A., & Smalley, I. J. (1994). Hydroconsolidation and subsidence of loess : Studies from China, Russia, North America and Europe: In memory of Jan Sajgalik. *Engineering Geology*, 37(2), 83–113. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90045-0)
- Rögner, K., Knabe, K., Roscher, B., Smykatz-Kloss, W., & Zöller, L. (2004). Alluvial loess in the Central Sinai: Occurrence, origin, and palaeoclimatological consideration. In *Palaeoecology of Quaternary Drylands* (Vol. 102, pp. 79–99). https://doi.org/10.1007/978-3-540-44930-0_6
- Roselli, R., & Diller, K. (2011). *Rheology of Biological Fluids*. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8119-6_4
- Rouis, F. (2017). *Effet des caractéristiques physico-chimiques des ajouts minéraux sur les propriétés rhéologiques des mortiers de bétons fluides équivalents* [Université de Sherbrooke]. <http://oatd.org/oatd/record?record=handle%5C%3A11143%5C%2F10545>
- Rousseau, D.-D., Derbyshire, E., Antoine, P., & Hatté, C. (2018). *European Loess Records*. <https://doi.org/10.7916/D8XH17TM>
- Rueda, M. M. (2017). *Rheology and processing of highly filled materials* (Numéro 2017LYSE1052) [Theses, Université de Lyon]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01537585>
- Ruhe, R. V. (1983). *Depositional environment of late Wisconsin loess in the midcontinental United States*. in Porter, S. C. (Ed.), *The Late Pleistocene. Volume 1: Late Quaternary Environments of the United States*, University of Minnesota Press, 130- 137.
- Russell, R. J. (1944). Lower Mississippi valley loess. *GSA Bulletin*, 55(1), 1–40. <https://doi.org/10.1130/GSAB-55-1>
- Saba, S., Barnichon, J. D., Cui, Y. J., Tang, A.M., & Delage, P. (2014). Microstructure and anisotropic swelling behaviour of compacted bentonite/sand mixture. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 126–132. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.006>.
- Sadeqi, S., Khabazi, N., & Sadeghy, K. (2011). Blasius flow of thixotropic fluids : A numerical study. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 16(2), 711-721. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2010.05.009>
- Salehi, T., Shokrian, M., Modirrousta, A., Khodabandeh, M., & Heidari, M. (2015). Estimation of the collapse potential of loess soils in Golestan Province using neural networks and neuro-fuzzy systems. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 9557–9567. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1894-4>
- Santos, P. H. S., Carignano, M. A., & Campanella, O. (2017). Effect of Shear History on Rheology of Time-Dependent Colloidal Silica Gels. *Gels* (Basel, Switzerland), 3(4). <https://doi.org/10.3390/gels3040045>

- Sarkar, P., & Bhowmick, A. K. (2018). Sustainable rubbers and rubber additives. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(24), 45701. <https://doi.org/10.1002/app.45701>
- Schmitt, T. M. (2015). *UNESCO as a Red Cross or as a notary of World Heritage? Structures, scale-related interactions and efficacy of UNESCO's World Heritage regime*. <https://www.mmg.mpg.de/61426/wp-15-05>
- Schramm, G. (1994). *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. Gebrueder Haake.
- Sedlmeyer, K.A. (1964). Der Harmattan als geographischewr faktor. *Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie*, 8, 33–44.
- Semalulu, O., Magunda, M., & Mubiru, D.N. (2016). Amelioration of sandy soils in drought stricken areas through use of Ca-bentonite. *Uganda Journal of Agricultural Sciences*, 16, 195. <https://dx.doi.org/10.4314/ujaas.v16i2.5>
- Shafiei, A., & Dusseault, M. (2008). *Geotechnical Properties of Collapsible Loess from Iran*. 61st Canadian Geotechnical Conference and the 9th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference At: Edmonton, AB, Canada.
- Shalaby, S. I. (2017). Potential Collapse for Sandy Compacted Soil during Inundation. - *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 4(5), 307-314. /paper/Potential-Collapse-for-Sandy-Compacted-Soil-during Shalaby/25dbde8e075bef7b7deadfb3aed561548194a3b2
- Shanthilal, J., & Bhattacharya, S. (2016). Characterisation of time-independent and time-dependent rheological behaviour simultaneously by multiple loop experimentation. *Journal of Food Science and Technology*, 53(11), 4106–4109. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2360-3>
- Sheeler, J. B. (1968). SUMMARIZATION AND COMPARISON OF ENGINEERING PROPERTIES OF LOESS IN THE UNITED STATES. *Highway Research Record*, 212. <https://trid.trb.org/view/126929>
- Smalley, I. J. (1966). The properties of glacial loess and the formation of loess deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 36(3), 669–676. <https://doi.org/10.1306/74D7153C-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Smalley, I. J., & Krinsley, D. H. (1978). Loess deposits associated with deserts. *CATENA*, 5(1), 53–66. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(78\)80006-X](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80006-X)
- Smalley, I. J., & Leach, J. A. (1978). The origin and distribution of the loess in the Danube basin and associated regions of East-Central Europe—A review. *Sedimentary Geology*, 21(1), 1–26. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(78\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0037-0738(78)90031-3)
- Smalley, I. J., & Smalley, V. (1983). Loess Material and Loess Deposits: Formation, Distribution and Consequences. In M. E. Brookfield & T. S. Ahlbrandt (Éds.), *Developments in Sedimentology* (Vol. 38, p. 51 - 68). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(08\)70788-X](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)70788-X)
- Smalley, I. J., & Vita-Finzi, C. (1968). The formation of fine particles in sandy deserts and the nature of desert' loess. *Journal of Sedimentary Research*, 38(3), 766–774. <https://doi.org/10.1306/74D71A69-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Smalley, I.J. (1995). Making the material: The formation of silt sized primary mineral particles for loess deposits. *Quaternary Science Reviews*, 14(7), 645–651. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0277-3791(95)00046-1)

- Smith, G. D. (1942). *Illinois loess: Variations in its properties and distribution, a pedologic interpretation*. <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/3113>
- Sochi, T. (2010). Single-Phase Flow of Non-Newtonian Fluids in Porous Media. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 48(23), 2437–2767. <https://doi.org/10.1002/polb.22144>
- Steffe, J. F., & Daubert, C. R. (2006). *Bioprocessing Pipelines : Rheology and Analysis*. Freeman Press.
- Stuut, J.-B. W., Prins, M. A., Schneider, R. R., Weltje, G. J., Jansen, J. H. F., & Postma, G. (2002). A 300-kyr record of aridity and wind strength in southwestern Africa: Inferences from grain-size distributions of sediments on Walvis Ridge, SE Atlantic. *Marine Geology*, 180(1), 221–233. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00215-8](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00215-8)
- Sultan, M. (2012). *Towards a high pressure piezoelectric axial vibrator rheometer* [These de doctorat, Pau]. <http://www.theses.fr/2012PAUU3015>
- Sun, M., Zhang, X., Tian, M., Liu, R., He, Z., Qi, L., & Qiao, Y. (2018). Loess deposits since early Pleistocene in northeast China and implications for desert evolution in east China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 155, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.09.013>
- Swineford, A., & Frye, J. C. (1945). A mechanical analysis of wind-blown dust compared with analyses of loess. *American Journal of Science*, 243(5), 249–255. <https://doi.org/10.2475/ajs.243.5.249>
- Szegi, T., Gál, A., Michéli, E., Tombácz, E. (2004). Quantitative rheological parameters for predicting soil deformation. *Eurosoil Conference Freiburg, CD ROM*.
- Szegi, T., Tombácz, E., Czibulya, Zs., Akagi, J., & Zsolnay, A. (2006). Quantitative Rheological Indicators for Soil Physical Degradation. *Agrokémia És Talajtan*, 55(1), 69–78. <https://doi.org/10.1556/Agrokem.55.2006.1.8>
- Tabarsa, A., Latifi, N., Meehan, C. L., & Manahiloh, K. N. (2018). Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay – A sustainable material for construction. *Construction and Building Materials*, 158, 454–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.096>
- Taibi, H. (2017). *Modélisation numérique de l'évolution des zones rigides au sein d'un écoulement stationnaire du fluid2* [Thèse de doctorat, Université de Djelfa]. <http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/handle/123456789/1252>
- Tixier, N. (2003). *Approche des propriétés rhéologiques de suspensions biologiques floculées* [Thèse de doctorat, Université de Limoges]. <http://aurore.unilim.fr/ori-oai-search/notice/view/unilim-ori-11936>
- Tu, X. B., Kwong, A. K. L., Dai, F. C., Tham, L. G., & Min, H. (2009). Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*, 105(1), 134–150. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.11.011>
- Ural, N. (2018). The Importance of Clay in Geotechnical Engineering. *Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75817>

- Varchanis, S., Makrigiorgos, G., Moschopoulos, P., Dimakopoulos, Y., & Tsamopoulos, J. (2019). Modeling the rheology of thixotropic elasto-visco-plastic materials. *Journal of Rheology*, 63(4), 609–639. <https://doi.org/10.1122/1.5049136>
- Velde, B. B., & Meunier, A. (2008). *The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks*. Springer Science & Business Media.
- Viguerie, L. de. (2009). *Propriétés physico-chimiques et caractérisation des matériaux du 'sfumato'* [Phd thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00544509>
- Vilar, O. M. V. M., & Rodrigues, R. A. R. A. (2011). Collapse behavior of soil in a Brazilian region affected by a rising water table. *Canadian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1139/T10-065>
- Vitale, E., Deneele, D., Paris, M., & Russo, G. (2017). Multi-scale analysis and time evolution of pozzolanic activity of lime treated clays. *Applied Clay Science*, 141, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.013>.
- Vlachopoulos, J., & Polychronopoulos, N. (2012). Basic Concepts in Polymer Melt Rheology and Their Importance in Processing. In *Applied Polymer Rheology: Polymeric Fluids with Industrial Applications* (pp. 1–27). <https://doi.org/10.1002/9781118140611.ch1>
- Wahba, M.M., Amal, M.A., Ebtisam I, Eldardiry., & Abd El-Hady, M. (2020). Improvement of sandy soil properties by using clay minerals. *Plant Archives*, 20(1), 2869-2874.
- Wallevik, J. E. (2009). Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown. *Cement and Concrete Research*, 39(1), 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.10.001>
- Wayal, A.S., Ameta, N.K., & Purohit, D.G. M. (2012). Dune sand stabilization using bentonite and lime, *Journal of Engineering Research and Studies*, Vol. III, 58–60.
- Weaire, D. (2008). The rheology of foam. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 13(3), 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2007.11.004>
- Whalley, W. B., Marshall, J. R., & Smith, B. J. (1982). Origin of desert loess from some experimental observations. *Nature*, 300(5891), 433–435. <https://doi.org/10.1038/300433a0>
- White, K., Livingstone, I., Gurney, S., Dearing, J., & Bateman, M. (2002). Post-processing of mineral mixture maps for mapping surficial materials: The example of the Matmata loess, southern Tunisia. *International Journal of Remote Sensing*, 23(15), 3091–3106. <https://doi.org/10.1080/01431160110104674>
- Wilkinson, T. J. (1997). Holocene environments of the high plateau, Yemen. Recent geoarchaeological investigations. *Geoarchaeology*, 12(8), 833–864. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6548\(199712\)12:8<833::AID-GEA2>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6548(199712)12:8<833::AID-GEA2>3.0.CO;2-6)
- Wissbrun, K. F. (1998). Transient rheometry. In A. A. Collyer & D. W. Clegg (Éds.), *Rheological Measurement* (p. 392 - 426). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4934-1_13
- Yaalon DH, Dan J (1974) Accumulation and distribution of loess-derived deposits in the semidesert and desert fringe areas of Israel. *Z Geomorphol Supplementband* 20:91–105

- Yaalon, D. H. (1987). Saharan dust and desert loess: Effect on surrounding soils. *Journal of African Earth Sciences* (1983), 6(4), 569–571. [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(87\)90096-0](https://doi.org/10.1016/0899-5362(87)90096-0)
- Yazarloo, R., Gholizadeh, J., Amanzadeh, A., & Mortazavi, S. (2017). The Effect of Nanokaolinite on the Compressibility and Atterberg Limit of the Silty Loess Soil in Golestan Province. <https://doi.org/10.11159/icnfa17.105>
- Yssaad, H. R. & Belkhodja, M. (2007). The effects of bentonite on the physic chemical characteristics of sandy soils in Algeria. *Journal of Applied Sciences*, 7, 2641–2645. <https://dx.doi.org/10.3923/jas.2007.2641.2645>
- Yuan, Z. X., & Wang, L. M. (2009). Collapsibility and seismic settlement of loess. *Engineering Geology*, 105(1), 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.002>
- Zenasni, M. A. (2015). Synthèse et caractérisation des nanocomposites biodégradables élaborés par trois procédés (intercalation en solution, polymérisation in situ et par voie fondue) [Thèse de doctorat, Université de Lorraine]. <http://www.theses.fr/2015LORR0290>
- Zhang, C., Jiang, G., Su, L., & Zhou, G. (2017). Effect of cement on the stabilization of loess. *Journal of Mountain Science*, 14(11), 2325–2336. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4365-4>
- Zhang, D., Wang, G., Luo, C., Chen, J., & Zhou, Y. (2009). A rapid loess flowslide triggered by irrigation in China. *Landslides*, 6(1), 55–60. <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0135-2>
- Zhang, W., Sun, Y., Chen, W., Song, Y., & Zhang, J. (2019). Collapsibility, composition, and microfabric of the coastal zone loess around the Bohai Sea, China. *Engineering Geology*, 257, 105142. <https://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.019>
- Zhang, X. w., Kong, L. w., & Li, J. (2014). An investigation of alterations in Zhanjiang clay properties due to atmospheric oxidation. *Géotechnique*, 64(12), 1003–1009. <https://doi.org/10.1680/geot.14.P.037>
- Zhang, C., Jiang, G., Su, L., & Zhou, G. (2017). Effect of cement on the stabilization of loess. *Journal of Mountain Science*, 14(11), 2325–2336. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4365-4>
- Zhang, X. W., Kong, L. W., Yang, A. W., & Sayem, H. M. (2017). Thixotropic mechanism of clay: A microstructural investigation. *Soils and Foundations*, 57(1), 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.01.002>
- Zhang, X., Lu, Y., Li, X., Lu, Y., Sun, J., & Pan, W. (2019). Multilevel Collapsibility of Loess under Irrigation in Jinya Town, Gansu Province, China. *Advances in Civil Engineering*, 2019, e2153679. <https://doi.org/10.1155/2019/2153679>
- Zhang, X., Shen, Z., Zhang, G., Chen, T., & Liu, H. (1996). Remote mineral aerosols in Westerlies and their contributions to the Chinese loess. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 39(2), 134–143. <https://doi.org/10.1360/ym1996-39-2-134>
- Zhou, W. J., Dodson, J., Head, M. J., Li, B. S., Hou, Y. J., Lu, X. F., Donahue, D. J., & Jull, A. J. T. (2002). Environmental variability within the Chinese desert-loess transition zone over the last 20000 years. *The Holocene*, 12(1), 107–112. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl525rr>

Zhu, G., Zhu, L., & Yu, C. (2017). Rheological properties of soil: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 64, 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>

Annexes



Annexe 1. L'essai de l'analyse granulométriques des échantillons par tamisage



Annexe 2. L'essai de l'analyse granulométriques des échantillons par sédimentométrie



Annexe 3. L'essai de limites d'Atterberg (Limite de liquidité)



Annexe 4. L'essai de limites d'Atterberg (Limite de plasticité)



Annexe 5. L'essai de la mesure de la teneur en carbonates de calcium (Calcimètre de Bernard)



Annexe 6. L'essai au bleu de méthylène des échantillons



Annexe 7. L'essai d'équivalent de sable par piston



Annexe 8. L'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande