

Table de matière

Introduction Générale.....	1
1. Chapitre I-GENERALITE SUR L'EROSION.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Caractérisation du milieu.....	4
1.2.1 Sol dans les ouvrages en terre	4
1.2.2 Minéraux argileux et leur structure	4
1.2.2.1 Minéraux d'argile	4
1.2.2.2 Liaison des minéraux argileux.....	6
1.2.2.3 Interaction entre l'eau et les minéraux argileux.....	7
1.2.3 Mécanisme de dispersion	8
1.3 Érosion dans les ouvrages en terre :	10
1.3.1 Typologie et mécanisme de rupture	10
1.3.1.1 Surverse	10
1.3.1.2 Erosion externe et l'affouillement	11
1.3.1.3 Erosion interne.....	12
1.3.2 Processus d'érosion interne	13
1.3.3 Exemples de rupture des barrages en remblais	15
1.4 Méthodes de détection de l'érosion.....	17
1.4.1 Surveillance	17
1.4.1.1 Dispositif d'auscultation.....	17
1.4.2 Les méthodes Géophysiques	19
1.4.2.1 Mesure de température	19
1.4.2.2 Méthode de résistivité.....	20
1.5 Conclusion.....	23
2. Chapitre II –METHODOLOGIE DE LA CARACTERISATION DE L'EROSION ET DE LA DISPERSION.....	24

2.1	Introduction	24
2.2	Caractérisation de l'érosion.....	25
2.2.1	Essais d'érosion interne.....	25
2.2.1.1	Essai d'érosion de trou (Hole Erosion Test).....	25
2.2.1.2	Essai triaxial d'érosion (« Triaxial Erosion Test »).....	26
2.2.2	Essais d'érosion externe	26
2.2.2.1	Erodimètre a Jet Mobile	26
2.3	Caractérisation de la dispersion.....	29
2.3.1	Essai à l'aiguille «Pinhole Test»	29
2.3.2	Essai d'émiettage «Crumb Test».....	31
2.3.3	Essai sédimentométrique en parallèle «Double Hydrometer Test»	32
2.3.4	Essai Chimique.....	34
2.4	Conclusion.....	37
3	CHAPITRE III : IDENTIFICATION ET CARACTERISATION D'UN SOL DISPERSIF	38
3.1.	Introduction	38
3.2.	Situations des matériaux	38
3.3.	Identification des sols testés	44
3.4	Caractérisation de dispersion.....	44
3.4.1	Essais de la sédimentation en parallèle	46
3.4.2	Crumb test	47
3.4.3	Pinhole test.....	48
3.5	Conclusion	48
4	CHAPITRE IV – STABILISATION PAR L'AJOUT DU CIMENT D'UN SOL DISPERSIF	49
4.1	Introduction	49
4.2	Étude bibliographique sur la stabilisation des sols dispersifs.....	50
4.2.1	Chaux	50
4.2.2	Laitde chaux	51
4.2.3	Cendres volantes	52
4.3	Propriété de l'additif ciment.....	53
4.4	Mécanisme de stabilisation par l'ajout de ciment	53
4.5	Résultats et discussion	55

4.5.1	Influence du ciment sur les limites d'Atterberg	55
4.5.2	Influence de ciment sur l'optimum Proctor.....	56
4.5.3	Influence du ciment sur L'essai d'émiéttage.....	57
4.5.4	Influence de ciment sur l'essai de sédimentation en parallèle	59
4.6	Conclusion.....	61
	Conclusion générale	62
	Références bibliographiques	63

Introduction Générale

Sous l'action d'un écoulement interne provenant du réservoir, les particules fines d'un ouvrage hydraulique peuvent être sujettes à des phénomènes d'arrachement et de transport. Cette migration, connue sous le nom d'érosion interne va influer sur la granulométrie et sur la porosité des matériaux constitutifs de l'ouvrage, ce qui va provoquer des variations au niveau des caractéristiques hydrauliques et mécaniques. Ceci peut engendrer une perte d'étanchéité, un renard, un glissement, un tassement, une surverse et au stade ultime une formation de brèche. L'érosion interne est considérée l'une des principales causes des instabilités d'ouvrages hydrauliques en terre. Or le phénomène d'érosion dépend fortement de la sensibilité des sols à la dispersion. Les sols dispersifs sont caractérisés par une structure instable, facilement déflocule dans l'eau, et donc très érodable.

Le présent travail de projet de fin d'études étudie la contribution à la caractérisation des processus du phénomène d'érosion et de dispersion des sols fins. Il s'agit de l'application des essais (La sédimentométrie en parallèle, essai d'émiéttage, l'essai de l'aiguille et les essais chimiques décrit selon les normes ASTM : D4221 – 99, D6572 – 00 et D4647 – 06) pour quatre sols de la région de Tlemcen. Autrement dit qu'il s'agit d'une étude expérimentale de la dispersion pour les sols étudiés.

Un autre volet de cette étude expérimentale est celui de la stabilisation vis-à-vis de la dispersion de sols le plus dispersif par l'ajout d'un liant hydraulique à savoir le ciment.

Après cette introduction le mémoire comporte les chapitres suivants :

Le chapitre 01 de caractère bibliographique concerne des définitions, éléments de bases et phénoménologie de la problématique évoquée dans le premier paragraphe de cette introduction. Par la suite une méthodologie avec un planning expérimental en termes de procédures et normes a fait l'objet de chapitre 02. Ce dernier contient les détails de chaque manipulation nécessaire dans la caractérisation de la dispersion. Le chapitre 3 est une étude expérimentale d'identification et caractérisation au laboratoire de quatre sols de la région de Tlemcen. La stabilisation par un liant hydraulique de sol le plus dispersif à fait l'objet de chapitre 04 avec une étude de l'influence de ce liant sur quelques propriétés géotechniques.

Nous achèverons par des conclusions relatives à ce travail de fin d'études.

1. Chapitre I–GENERALITE SUR L’EROSION

1.1 Introduction

L’érosion interne est définie comme l’entraînement progressif des particules constituant l’ouvrage sous l’action de l’écoulement qui le traverse Comité Française des Grandes Barrages [CFGGB]. La grande difficulté est qu’elle est initiée par l’intersection de circonstances rares et difficiles à localiser. Elle est, de très loin, le mode de vieillissement principal des ouvrages en terre à vocation hydraulique et de leur fondation. Elle peut s’amorcer, puis se développer sournoisement pendant plusieurs mois, années ou dizaines d’années, avant de conduire en quelques minutes à la ruine du barrage ou de la digue.

Il n’est pas possible de proposer une méthodologie de calcul des ouvrages anciens à l’érosion interne. La tâche est trop grande. A l’heure actuelle, il n’y a pas de théorie généralisée de l’érosion qui puisse fournir un outil de calcul des digues à l’érosion interne. Derrière cette lacune, se cache une évidente complexité.

Ce chapitre permet de mieux comprendre et approfondir dans les notions de base sur l’érosion et la dispersion des argiles, on va étudier en fonction d’utilisation des méthodes expérimentales, ces essais doivent aider l’ingénieur de caractériser l’enjeu à partir de contrôler l’initiation de l’érosion interne.

1.2 Caractérisation du milieu

1.2.1 Sol dans les ouvrages en terre

Dans les études géotechniques, il est d'usage de désigner par le vocable sol tous les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre, qu'il s'agisse de roche ou de matériaux meubles comme les sables ou cohérents comme les argiles ou les tourbes. Les roches sont compactes, dures et résistantes. Elles ne peuvent être réduites en morceaux qu'à la suite de très grosses mécaniques. Les sols cohérents ou pulvérulents, au contraire, sont des matériaux susceptibles d'être soit séparés en grains, soit déformés à la main ou par la mise en œuvre d'une énergie mécanique relativement faible.

Le sol est défini ici comme un élément qui est composé de trois phases : (a) solide (b) liquide (c) gaz. Il est classé principalement selon la distribution de la taille des grains.

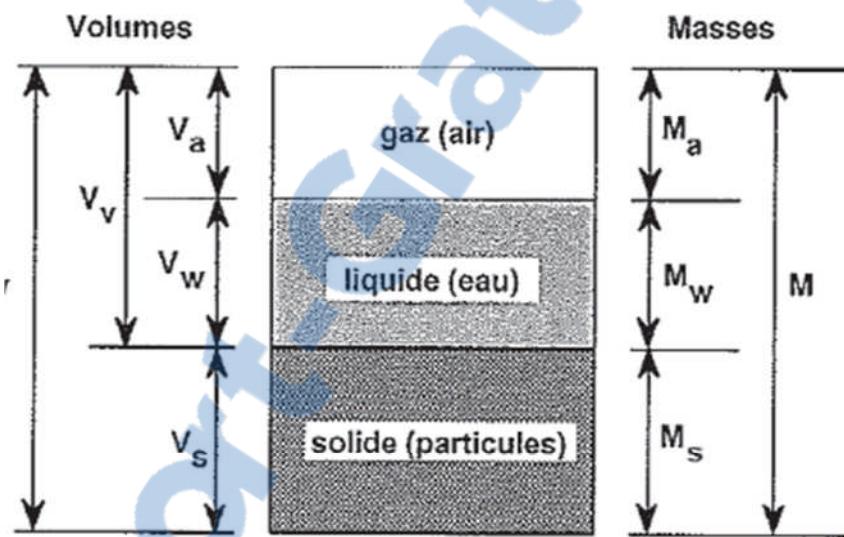


Figure 1.1 : Schéma d'un volume élémentaire de sol (diagramme des phases).

1.2.2 Minéraux argileux et leur structure

1.2.2.1 Minéraux d'argile

a- Kaolinite

La kaolinite ne présente aucune substitution isomorphique, les charges disponibles pour la fixation de cations hydratables ne se trouvant qu'en bordure des feuillets élémentaires. Le diamètre de la particule est de l'ordre de $1\mu\text{m}$

Le feuillet élémentaire est 1/1, la particule élémentaire comporte quelques dizaines de feuillets.

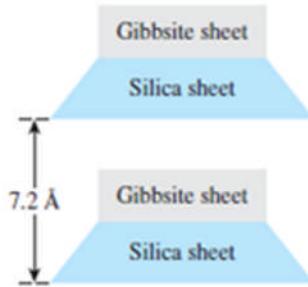


Figure 1.2 : Structure de la kaolinite (Das M. , 2010).

N'ayant pas de substitution isomorphique les liaisons entre feuillets sont très stables.

b- Illite

Le feuillet élémentaire est 2/1. Dans les couches tétraédriques un cation Si^{4+} sur quatre est remplacé par un cation AL^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions potassiums K^+ anhydres situés entre les feuillets.

Le potassium situé entre les feuillets compense les charges internes et bloque toute hydratation et foliaire (Figure 1.3). La particule primaire d'illite comporte une dizaine de feuillets qui lui donne une largeur de 0,3 μm et une épaisseur de 10 nm.

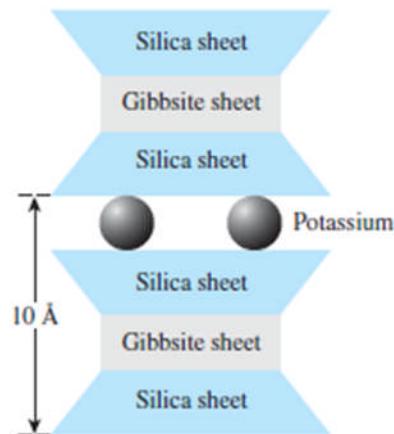


Figure 1.3 : Structure de l'Illite (Das M. , 2010).

c- Montmorillonite

Le feuillet élémentaire est 2/1. Pour la montmorillonite, le déficit de charge interne aux feuillets est provoqué par des substitutions de cations Al^{3+} en couche octaédrique par des cations Mg^{+2} . Ce déficit de charge qui en résulte est compensé par des cations hydratés échangeables localisés entre les feuillets. L'épaisseur des feuillets dépendra de l'état d'hydratation. Le nombre de feuillets dépendra des paramètres minéralogiques, la nature des

cations échangeables et la concentration en sels de la solution. L'unité morphologique est un assemblage bord à bord de particules primaires qui constituent des rubans plus ou moins chiffonné.

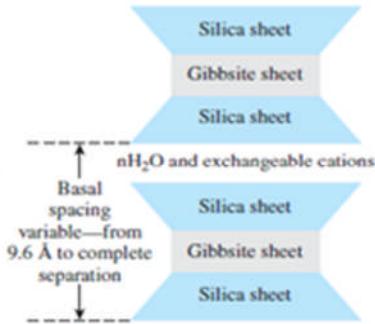


Figure 1.4 : Structure de la montmorillonite (Das M. , 2010).

1.2.2.2 Liaison des minéraux argileux

Les propriétés des argiles, en particulier dans un environnement sol-eau, sont déterminées par la nature de la liaison entre les atomes composant les feuilles du minéral argileux, et la liaison entre les feuilles de minéraux argileux. Les mécanismes de ces liaisons sont les suivantes :

Liaisons primaires :

Ce sont soit :

Les liaisons covalentes, où deux noyaux atomiques part un ou plusieurs électrons, par exemple, la molécule d'hydrogène • H _ • H _ H: H.

Les liaisons ioniques, qui résultent de l'attraction électrostatique entre les ions positifs et négatifs (ions sont des atomes libres qui ont gagné ou perdu un électron).

Positif ions chargés sont appelés cations, chargée négativement comme anions ; Quand un formulaire de liaison ionique, les centres de charge négative et positive sont séparés et forment un dipôle. Le dipôle a alors une " fin " positive et chargée négativement, même si elle est globalement neutre.

L'eau est un exemple d'une molécule qui forme un dipôle comme le montre la figure 1.5. Cette nature dipolaire à un effet important sur le comportement de l'eau dans les argiles; Les liaisons métalliques, qui sont de peu d'importance dans l'étude des sols.

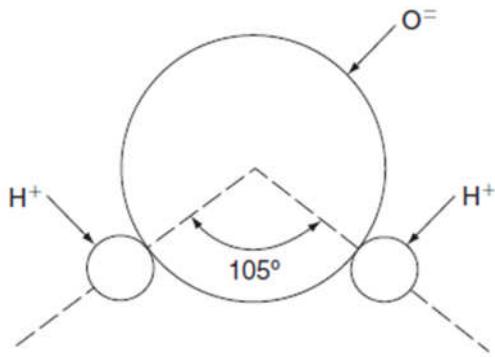


Figure 1.5 : Schéma d'une molécule d'eau (Fell et al., 2005).

Liaisons secondaires

Les liaisons hydrogène. Activité aura lieu entre les extrémités de charge opposée de dipôles permanents. Lorsque de l'hydrogène est l'extrémité positive du dipôle, la liaison résultante est connue sous le nom de liaison hydrogène ;

Liaisons de Van der Waal's : Comme les électrons tournent autour du noyau d'un atome il y aura des moments où il n'y a plus d'électrons sur un côté de l'atome que l'autre, donnant lieu à un faible dipôle instantané. Ce ne sera pas stable dans une seule direction. L'attraction des pôles positifs et chargés négativement du dipôle fluctuant provoque une liaison faible connue comme la liaison de Van der Waal's. Ces obligations sont additives entre les atomes, et bien que faible par rapport à des liaisons hydrogène.

1.2.2.3 Interaction entre l'eau et les minéraux argileux

L'eau influence considérablement les sols à grains fins et en particuliers les argiles. la variation de la teneur en eau se traduisent par augmentation de la plasticité et les limites d'Atterbeg constituant les bornes de cette influence. Il est très rare que la distribution granulométrique soit un facteur déterminant du comportement des sols fin, (Holtz. et Kovacs, 1991).

Eau adsorbées

Il ya beaucoup de preuves que l'eau est attirée par des minéraux argileux, par exemple:

- ✓ Les sols secs absorbent l'eau de l'atmosphère, même à de faibles sols d'humidité
- ✓ Les sols relativement mouiller et gonflent quand donné accès à l'eau;
- ✓ Les températures supérieures à 100 ° C sont nécessaires pour chasser toute l'eau des sols

Une grande partie de l'eau dans le sol est adsorbé à-dire la charge électrique des dipôles de l'eau et de la charge électrique associée à la surface des minéraux argileux s'attirer.

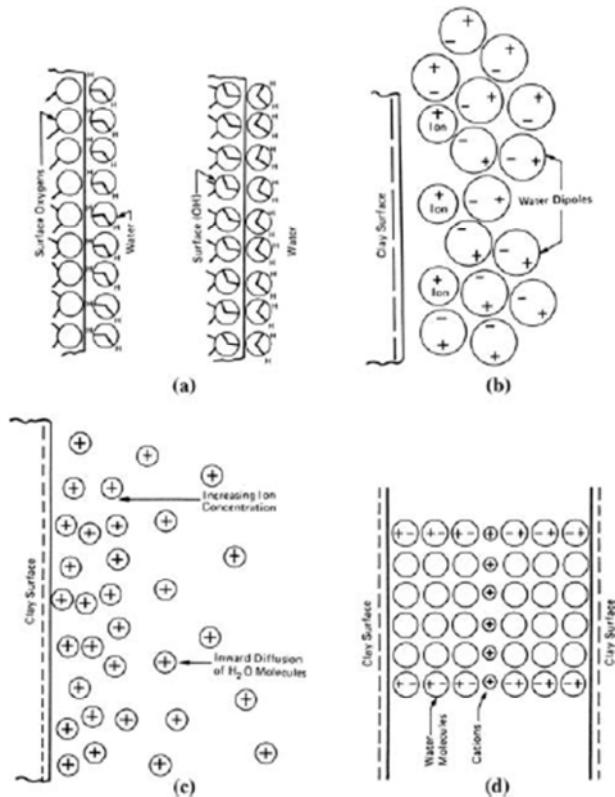


Figure 1.6 : Distribution des ions de la surface d'argiles selon le concept de la double couche diffuse (Fell et al., 2005).

Il ya plusieurs explications à cela comme le montre la figure 1.6.

Une liaison hydrogène, où le côté positif de H du dipôle de l'eau est attirée vers la surface des atomes d'oxygène, ou le côté négatif de l'O du dipôle de l'eau est attiré à la surface des hydroxyles ;

- ❖ L'hydratation d'ions, où les dipôles de l'eau avec les cations sont attirés, qui sont à leur tour attirée par la charge négative de la surface du minéral argileux ;
- ❖ Osmose : Lorsqu'il y a une grande concentration des cations près de l'argile, les molécules d'eau tendant à désamorcer vers l'extérieur afin d'essayer d'égaliser les concentrations.
- ❖ Attraction de dipôle : Dipôles de l'eau s'orientant comme représenté sur la figure, avec un cation central pour égaliser les charges.

1.2.3 Mécanisme de dispersion

Lorsque deux particules d'argile sont à proximité les uns des autres, les domaines potentiels se chevauchent, ce qui conduit à la répulsion si les particules sont suffisamment proches. Ces forces de répulsion sont neutralisées par les forces d'attraction de Van der Waal's, comme indiqué sur la figure 1.7. Si les forces répulsives sont plus importantes que les forces de Van der Waal's le sol sera dispersé. Dans les cas où les forces de répulsion sont petites, les forces de Van der Waals attractives dominent et les résultats de la flocculation.

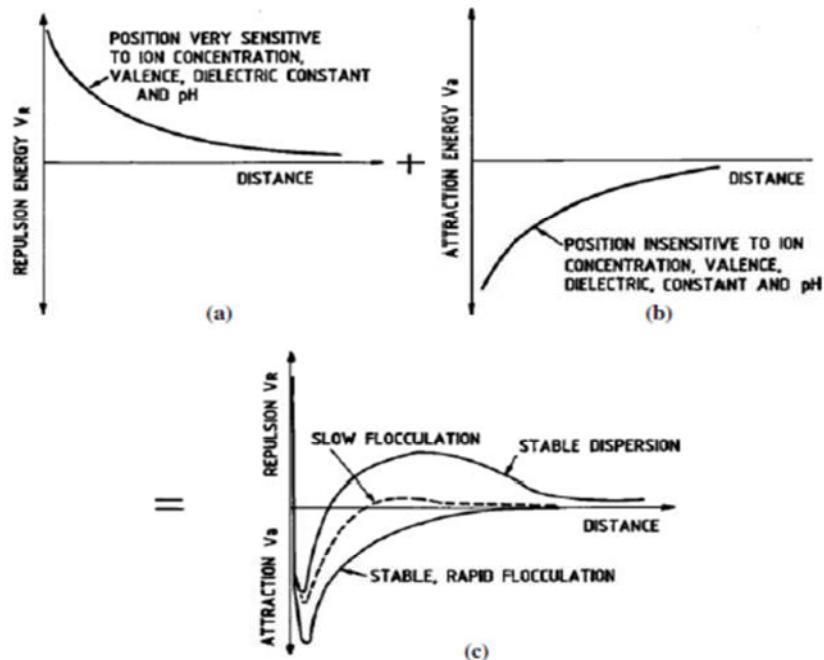


Figure 1.7 : Interaction entre de répulsive a et b de force d'attractive de Van der Waal's pour obtenir une énergie de attraction ou répulsion (Fell et al., 2005).

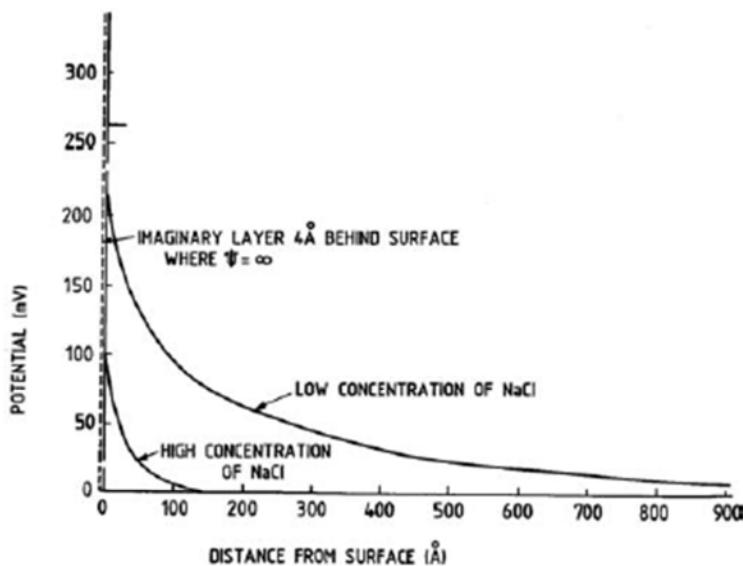


Figure 1.8 : Effet de concentration conduit à diffuse à double couche (Fell et al., 2005).

Les forces de répulsion dans la double couche diffuse sont affectées par plusieurs facteurs : (a) la concentration de l'électrolyte: Comme le montre la figure 1.8, une concentration élevée de sel dissous dans l'eau du sol conduit à une plus petite diffuse à double couche comme la plus grande concentration de cations Na^+ surmonte plus facilement la charge négative sur la surface de l'argile. Par conséquent, les forces répulsives sont plus faibles; (b) de cations de valence: Échange de Na^+ cations par cations Ca^+ conduit à un plus petit, plus la densité de charge à double couche diffuse et les forces répulsives donc inférieure.

1.3 Érosion dans les ouvrages en terre :

1.3.1 Typologie et mécanisme de rupture

1.3.1.1 Surverse

La surverse c'est un phénomène qui est engendré lorsque l'eau se dépasse le haut niveau de la digue conduit à la brèche directement et rapidement par l'érosion régressive du talus coté terre puis de la crête (figure 1.9). Cet ensemble procédé constitue à l'une des principales causes des ruptures des digues en remblai ce qui est passé en deux siècles précédent avec les digues fluviales à cause des crues. Dans plus de deux tiers des cas de surverse on a pu identifier un point bas sur le profil en long de la digue qui induit la concentration des débits, l'initiation de l'érosion régressive n'est plus évidemment à détecter et l'ouverture des brèches a cause des données insuffisamment précise pour l'évaluation des hauteurs. Si on pose une question : les digues sont capables de supporter la matière de surverse pour en soit en précaution. On adopte la repousse, donc les digues ne peuvent pas être supportables de la surverse. Pour nuancer cette repousse on peut prendre quelque élément qualitatif comme suit : Le caractère localement plus ou moins sableux des matériaux constitutifs des remblais et l'hétérogénéité dans la compacité sont des facteurs qui aggravent la sensibilité des digues à la surverse.

Un profil en long irrégulier de la crête de digue, avec présence de points bas dus à des défauts de nivellement, des tassements différentiels ou des terrassements sauvages, va induire une concentration locale des débits de surverse ;

A contraire, une digue bien compactée, présentant un profil en long très régulier, avec des talus bien enherbés et une crête revêtue est probablement susceptible de supporter des surverses de quelques centimètres, imités dans le temps. (Mériaux et al., 2004).

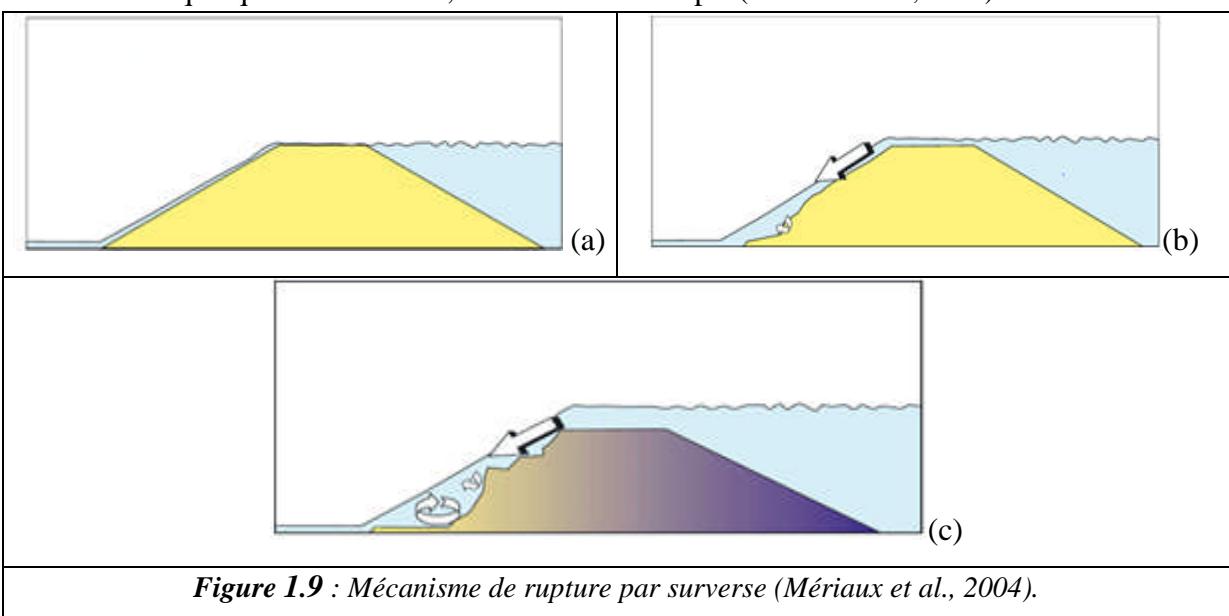


Figure 1.9 : Mécanisme de rupture par surverse (Mériaux et al., 2004).

1.3.1.2 Erosion externe et l'affouillement

L'effet de courant hydraulique peuvent créer des érosions au fond de la digue qui résulte une diminution de la pente locale qui compagne à un fatigue dans les caractéristiques mécanique entraîne un glissement permettant leur tour perturbation hydraulique et les érosions on créations des berges on peut avoir le déclenchement de phénomène de surverse qui est présente par une brèche dans la digue signifie que le mécanisme de surverse accélèrent le processus dès qu'elle se produit. (Mériaux et al., 2004).

Les facteurs de sensibilité à ce type de dégradation sont de trois ordres :

La vitesse moyenne de l'eau le long du talus de levée, qui est liée à la distance de la digue par rapport au lit mineur, et à la berge. De ce point de vue, les digues en bordure immédiate du lit mineur sont particulièrement exposées, ainsi que les digues situées dans des zones de rétrécissement du lit majeur ;

Perturbation hydraulique locale pouvant entraîner des courants et tourbillons avec des vitesses locales plus élevées que la vitesse moyenne du tronçon. Ainsi des arbres, des piles. Il en va de même pour des courbes prononcées dans l'axe de la digue ;

Nature et état de la protection du talus de la digue côté fleuve. Ainsi, un perré en bon état est réputé pouvoir résister à une vitesse moyenne de 4 m/s, alors qu'un talus simpelement enherbé supportera des vitesses ne dépassant pas 1.5 m/s. Le changement de nature de la protection constitue aussi un facteur de vulnérabilité.

Les dégradations causé par érosion externe peut produire coté aval, on met a part le cas d'érosion qui se déroulent dans le cadre du mécanisme de surverse qui sont localisées a propriuniquement a proximité des réservoirs.



Figure 1.10 : Affouillement d'une digue.

1.3.1.3 Erosion interne

L'érosion interne ne se développe que si deux conditions nécessaires sont réunies : l'arrachement des particules et leur transport. (Blais, 2005).

La classification d'après institut de recherche et d'expérimentation (IREX), huit phénomène peuvent être classé comme initiateurs de l'érosion interne peuvent engendrer deux grandes types du transport déférents.

Le schéma si dessus présentent les différents types d'érosion interne

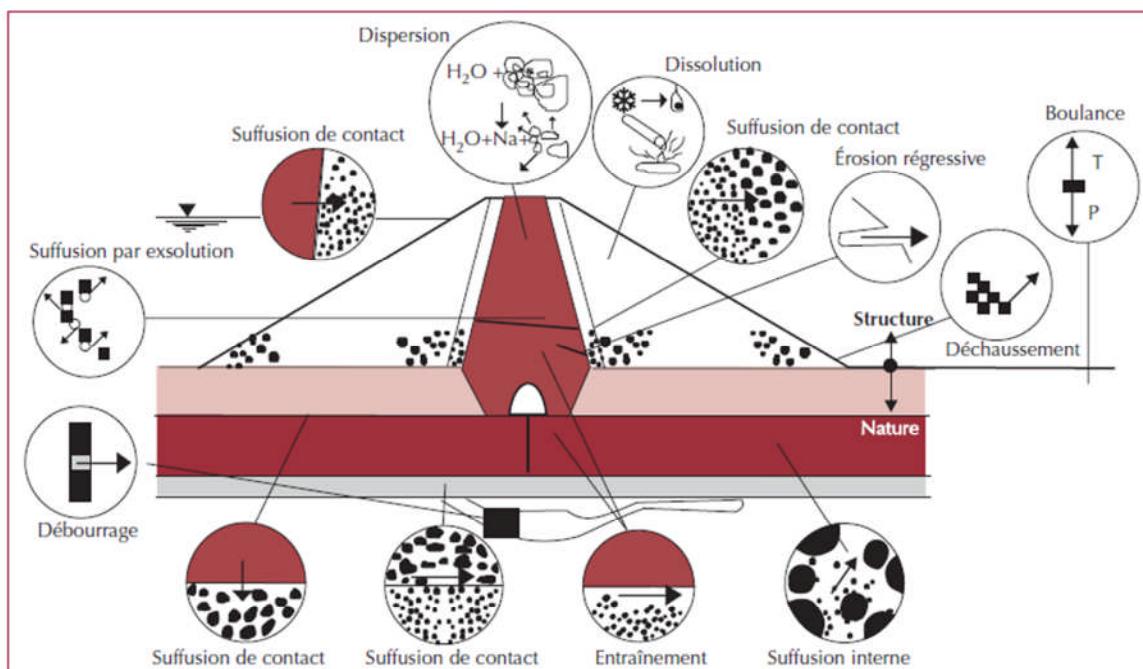


Figure 1.11 : Schéma représentatif des divers phénomènes initiateur de l'érosion interne dans un barrage (Blais, 2005).

Les huit phénomènes d'arrachement sont :

Boulance : la boulance ou l'annulation de la contrainte par le gradient hydraulique, et l'état d'un volume de sol dans lequel les grains flottent, entourés d'une phase liquide continue, sous l'action d'une pression d'eau qui annule la contrainte effective.

Suffusion : signifie n'existe que le mouvement des grains petites non structuré lorsqu'il la vitesse locale dépasse certaine limite. Ce phénomène compose de trois types interne, surfacique et externe. Le premier est au sein d'une masse de sol ou la granulométrie n'assure pas l'auto filtration. Le deuxième dépend du contact matériau grossier et le matériau fin sous un écoulement parallèle ou perpendiculaire à l'interface. La suffusion externe se développé à l'interface d'un matériau et de la rivière ou l'air libre.

Érosion Régressive : elle consiste de deux types concerne tout l'érosion qui produise en un point aval et suit avec progresse vers l'amont.

Les remblais à cause de déformations du squelette par l'écoulement résurgent dénommé le déchaussement. Le second type c'est régressive par conduit un ou plusieurs conduits se développé à l'aval et par l'érosion progressive qui forment l'extrémité amont du chenal.

Déboufrage : c'est le déséquilibre d'un volume du sol sous l'action de poussé de l'eau et la résistance n'est plus compensé.

Dissolution : c'est la dispersion d'une partie des constituants des particules sous action chimique ou thermique.

Dispersion : c'est la défloculation des grains interne.

Entrainement : c'est le détachement des particules des parois d'une conduite d'un canal ou rivière, c'est lui qui commande la vitesse de développement des renards.

Exclusion : c'est phénomène résulte une diminution locale de perméabilité et augmentation des pressions interstitielles.

Il est difficile de distinguer le déclenchement d'érosion interne c'est tous ces phénomènes combiné entre eux, mais rester insuffisant de faire la rupture si la condition du transport des particules n'est pas assurée.

Transport : les particules doit être transportées après l'arrachement cette phase est représenté sous deux formes ou deux types qui sont :

- Le transport dans un conduit connu par phénomène du renard.
- Le transport dans l'espace poreux inter particulaire le phénomène du la suffusion.

Le premier concentré dans un conduit c'est le plus danger et rapide, conduit à une rupture rapidement. Ou dans le second la perméabilité du milieu qui diffus dans l'espace poreux inter particulaire est lentement modifié. Après développement on avoir la rupture.

Ce travail se fait par Blais pour chaque phénomène initiateur ou transport.

1.3.2 Processus d'érosion interne

L'érosion interne est un processus selon lequel les particules sont éloignées du noyau ou de la fondation en empruntant des voies de migration préférentielles. Ce procédé est initialement favorisé par:

- La présence d'un chemin d'infiltration et d'une source d'eau.
- L'existence de matériaux érosifs à l'intérieur de ce chemin et transportables par le flux d'infiltration.
- L'absence de protection qui pourrait retenir ces particules.

Plus le processus de l'érosion évolue, plus il y a de chance que se forment dans le barrage des conduites de circulation d'eau.

(a) L'initiation:

Cette phase se manifeste quand un phénomène de détachement de particules apparaît. Ce phénomène peut à son tour être soutenu, lorsqu'il existe au sein du barrage, par:

- Une concentration de fuite dans les fissures préexistantes ou causées par dessiccation, par gel ou dégel et/ou par fracturation hydraulique.
- Une concentration de fuite dans les voies interconnectées formées par les matériaux grossiers et/ou de faible compaction dans la zone perméable.
- Un détachement des particules du sol en présence d'infiltration dans une surface libre non protégée par des filtres.
- Un phénomène de la suffusion: définie comme étant une érosion sélective des particules fines de la matrice des particules grossières.

(b) La continuité de l'érosion:

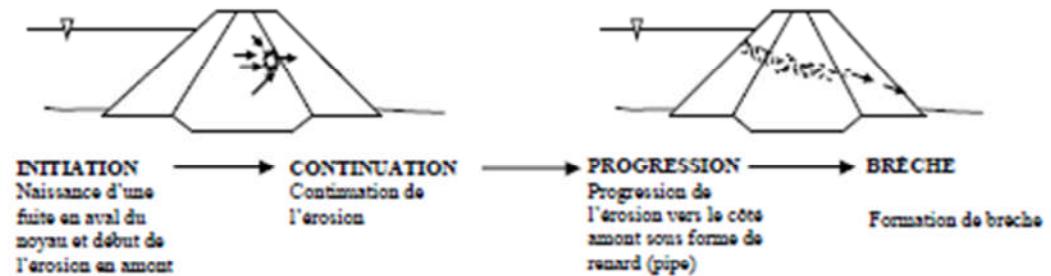
Cette phase dépend de la présence dans le barrage de filtres et de zones de drainage construits en respectant les critères de construction des filtres. Ce qui n'est pas souvent le cas retrouvé dans les vieux barrages. La présence de ces filtres et de ces drains dans un barrage permet de retenir les particules déplacées pendant la décharge dans la fondation ou le remblai sans toutefois favoriser l'accumulation d'un excès de pression dans les pores (CNGB, 1994). C'est un rôle qui est aussi accompli grâce au processus d'auto filtration du barrage. Toutefois, leur absence contribuerait à la progression de l'érosion dans le domaine (Foster *et al.*, 2001).

(c) La progression de l'érosion :

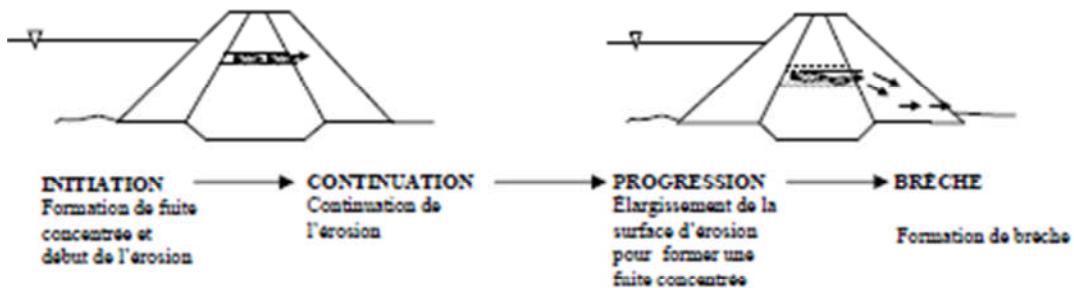
Cette étape est définie par une évolution graduelle vers le côté amont du barrage du détachement des particules qui sont transportées par le flux d'infiltration. Elle favorise la formation et les 11 maintiens des renards, l'augmentation du suintement et de la pression des pores dans la partie aval du barrage.

(d) Le développement de brèches :

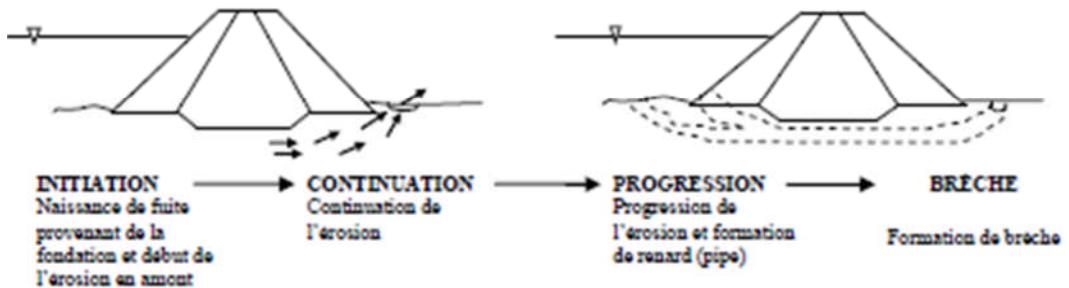
Cette phase résulte de la circulation des eaux du réservoir (principalement celui en amont). A ce niveau, le processus d'érosion interne est bien avancé. Les eaux qui circulent dans le barrage se sont défini une trajectoire aléatoire.



A) RENARD DANS LES REMBLAIS INITIE PAR UNE EROSION REGRESSEIVE



B) RENARD DANS LES REMBLAIS AMORCE PAR UNE CONCENTRATION DE FUITE



C) RENARD DANS LA FONDATION AMORCE PAR UNE EROSION REGRESSEIVE

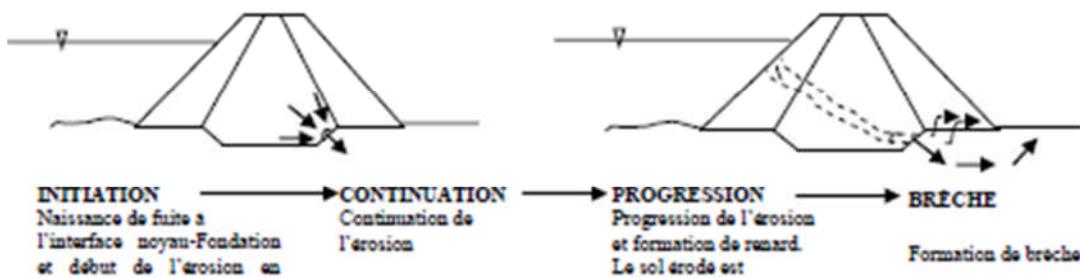


Figure 1.12 : Exemple de processus d'érosion interne dans un barrage : (A et B) avec formation de renard dans le remblai par érosion rétrogradant en amont et par fuite concentrée, (C) avec formation de renard dans la fondation par érosion rétrogradant en amont, et (D) avec formation de renard du remblai à la fondation (Fell et al., 2001).

1.3.3 Exemples de rupture de barrage en remblai

Le barrage Teton est un exemple de grand barrage en remblai dans lequel des variations importantes des pertes d'eau ont abouti à une rupture de la structure. Le barrage de 94m de hauteur avait été construit en 1975 à des fins hydroélectriques. En 1976, on note le

développement rapide d'une érosion interne, développement rétrograde au cours des premières années de remplissage du réservoir qui fait place à la formation de renards du noyau vers la fondation de la structure.

Aucun signe de fuite n'avait été constaté dans les huit premiers mois de remplissage du réservoir en 1975. Cependant, deux jours avant la catastrophe, soit le 3 Juin 1976, des écoulements d'eau avaient été repérés en aval du barrage d'environ 6.31 l/s de débit. Un jour avant, une augmentation de l'humidité en aval sur l'appui latéral du barrage est détectée et des écoulements d'eau additionnels d'environ 1.3 l/s étaient visibles. Le 5 juin 1976 à 7h, des débits de fuite d'eau de 56 l/s ont été mesurés sous le sommet du barrage provenant d'une source à la jonction remblai-appui. Par la suite, des fuites d'environ 500 à 800 l/s ont été mesurées au pied du barrage sur le côté aval (Marche, 2008; Solava et Delatte, 2003). Ces eaux contenaient des débris de matériaux. Trois heures après, le débit avait augmenté remarquablement d'environ 400 l/s. Il avait été noté une progression ascendante de l'érosion vers l'amont du barrage. Le phénomène aurait ainsi progressé jusqu'à l'effondrement du barrage 4 heures après le début des grosses fuites d'eau.

Des études approfondies après la rupture du barrage, ont conclu que, d'une part le site était principalement caractérisé par la présence d'un vaste système rhyolite-tuf dans le substratum qui le rendait ainsi perméable. D'autre part, le noyau contenait en grande partie du silt provenant d'un abondant dépôt éolien. Il constituait donc la partie du barrage la plus vulnérable à une érosion. Les résultats avaient été confirmés par des essais de pompage, des tests de percolation et des études géotechniques réalisés sur le site (Seed et Ducan, 1987; Smalley et Dijkstra, 1991). (*Cité par Tchoumkan*).



Figure 1.13 : Rupture du barrage Teton en 1976.

1.4 Méthodes de détection de l'érosion

Il existe un grand nombre de méthodes de détection de l'érosion interne, souvent utilisé pour l'enquête de l'intégrité des barrages en remblai ou utilisés pour la réparation du barrage ou d'une enquête des dommages structurels existants. Ces méthodes ont la possibilité de détecter et de donner des avertissements précoce de l'érosion interne.

1.4.1 Surveillance

La surveillance des barrages est basée sur l'inspection visuelle et l'auscultation.

Ces deux méthodes sont complémentaires :

- l'inspection visuelle est une méthode qualitative qui est fondamentale car elle intègre la complexité du comportement de l'ouvrage ;
- l'auscultation est une méthode quantitative qui met en œuvre une instrumentation et une analyse des mesures spécifiques à chaque ouvrage.

L'auscultation est indispensable pour le suivi du barrage, de sa conception à sa mise hors service.

C'est une composante de son comportement structurel et du contrôle de la sécurité. Elle est également précieuse pour faire progresser la connaissance sur le comportement et le vieillissement du barrage, et permettre d'améliorer les études et expertises dans leurs différents aspects techniques et économiques (Poupart *et al.*, 2001). De ce point de vue, l'auscultation est une composante essentielle de progrès. Elle permet d'indiquer à l'exploitant avant qu'il ne soit trop tard les travaux de confortement nécessaires et, dans les cas extrêmes, les mesures d'urgence assurant la protection des populations en aval. (Bonillia *et al.*, 2005)

1.4.1.1 Dispositif d'auscultation

Le but recherché est de réunir des informations suffisantes, en nombre et en qualité, pour détecter en temps utile les phénomènes évolutifs susceptibles de nuire à la sécurité de l'ouvrage. L'inspection visuelle est la partie majeure de la surveillance des barrages : elle permet souvent de détecter des désordres et anomalies affectant un ouvrage. Par contre, l'auscultation est une méthode quantitative basée sur l'utilisation d'instruments de mesure, choisis et positionnés pour rendre compte de l'évolution du comportement de l'ouvrage. Le dispositif d'auscultation doit donc être conçu en fonction du type, des dimensions et des particularités techniques du barrage.

Pour les petits barrages, le dispositif d'auscultation doit être constitué d'instruments simples, robustes et de lecture facile (Degoute, 1997) :

Mesure de la cote du plan d'eau

Cette mesure participe à trois objectifs :

- ✓ Améliorer la gestion de la retenue par une connaissance continue des volumes d'eau disponibles ;
- ✓ Participer à l'auscultation du barrage en permettant d'examiner l'influence de la cote de la retenue sur les mesures de certains instruments (en particulier débits et piézométrie) ;
- ✓ Enrichir les données hydrologiques par mesure des débits de crue.

La gestion d'un barrage vanné et l'amélioration des données hydrologiques justifient, dans certains cas, l'installation d'un limnimètre enregistreur. Dans tous les autres cas, et en particulier pour les besoins de l'auscultation, une échelle limnimétrique convient tout à fait pour la mesure de la cote du plan d'eau.

Mesure des débits

Deux procédés de mesure des débits sont envisageables

- ✓ Par capacité (mesure du volume recueilli dans une capacité jaugée pendant un temps donné) ;
- ✓ Par mesure de la lame déversant en amont d'un seuil calibré.

Mesure de la piézométrie

Il est important de vérifier dans la fondation et dans le remblai la position de la surface phréatique et l'évolution des pressions interstitielles.

On peut classer les appareils de mesure en deux types :

- ✓ Les piézomètres à tube ouvert dont la longueur crête est de quelques dm à plusieurs mètres ;
- ✓ Les cellules de pression interstitielle (à corde vibrante, à contre-pression).

Les cellules de pression interstitielle fournissent des mesures ponctuelles précises et elles ont des temps de réponse plus rapides que les piézomètres.

Le piézomètre à tube ouvert, peu coûteux et de lecture aisée, permet de détecter les anomalies dans la fondation ou dans le talus aval.

On implante alors les piézomètres dans des profils rive à rive. Compte tenu du temps de réponse, le piézomètre à tube ouvert convient mieux aux terrains perméables.

Mesure des déplacements

On peut distinguer plusieurs types de mesure des déplacements :

- ✓ des mesures de déplacements absolu de repères du barrage par rapport à des piliers d'observation fixes implantés dans des zones non susceptibles d'être affectées par des mouvements; on peut réaliser des mesures altimétriques et des mesures planimétriques;

- ✓ des mesures de déplacements internes du remblai : verticaux à l'aide de tassomètres, horizontaux à l'aide d'inclinomètres ou d'elongomètres ;
- ✓ des mesures de déplacements relatifs des structures en béton : pendulent dans la tour de prise,

La mesure la plus courante est celle du tassement ; ce dernier évolue en général peu après quelques années. Il est important de commencer les mesures de tassement dès la fin du compactage des dernières couches du remblai au droit des joints de la galerie de visite.

1.4.2 Les méthodes Géophysiques

Des différentes méthodes ont été testées pour des enquêtes sur d'état des barrages et la détection des fuites sur les barrages en remblai. Johansson et al. (1995) résume les nouvelles méthodes possibles pour les enquêtes sur les barrages en remblai dans un rapport complet. Pour la détection de l'infiltration anormale et l'érosion interne, cependant, il est conclu que la méthode d'auto-potentiel, la méthode de résistivité et la température peuvent avoir les meilleures perspectives. En plus de ces méthodes géophysiques, le contrôle de la turbidité ou hydro-chimiques de l'eau d'infiltration ont été considérés comme des méthodes intéressantes.

1.4.2.1 Mesure de température

Les mesures de température ont démontré une puissante méthode pour la détection des infiltrations élevées dans les digues (Johansson, 1997). La technique basée sur fait que l'augmentation des infiltrations affecte le profil de température dans le barrage. Cet effet de température peut être mesurée et liés au débit d'infiltration (Sjodahl, 2006).

Les mesures de température sont effectuées selon des profils transversaux et longitudinaux dans des piézomètres ou dans des tubages creux battus dans le sol au marteau pneumatique jusqu'à 15 à 20 m de profondeur. Une chaîne de capteurs de température espacés de 1 m est introduite dans chaque tube et permet d'identifier la (ou les) zone(s) concernée(s) par les pics thermiques (Lautrin, 2003).

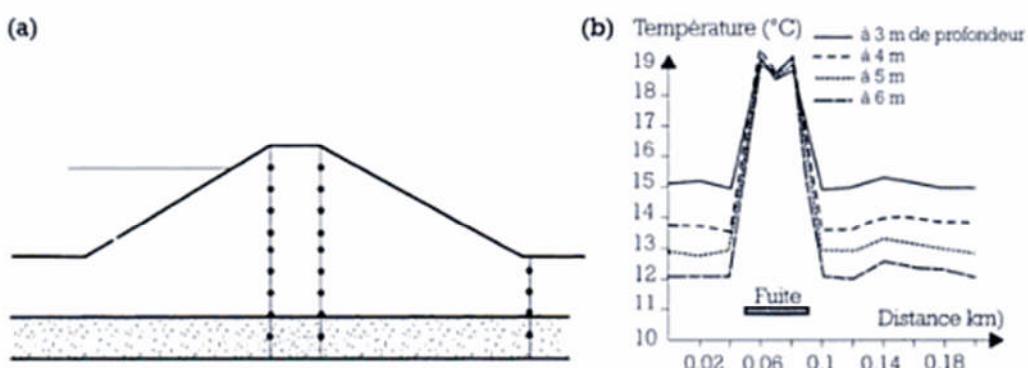


Figure 1.14 : La thermométrie profonde. (a) : Schéma de dispositif de mesure, (b) : Exemple de fuite détecté par thermométrie profonde (Lautrin, 2003).

1.4.2.2 Méthode de résistivité

Les techniques géophysiques sont des méthodes indirectes de caractérisation des sols. Les méthodes de prospection électrique et électromagnétique ont été sélectionnées pour leur grande sensibilité aux paramètres des sols, en particulier l'humidité des sols, leur état de compactage, leur nature, leur structure et leur homogénéité. Des études seront faites pour combiner entre les variables géophysiques et paramètres d'état des sols.

Origine de la conductivité électrique des sols

Le sol est un milieu hétérogène triphasique. Le courant peut être, en théorie, conduit par chacune des 3 phases (gazeuse, liquide, solide). Cependant, la phase gazeuse est un très bon isolant. La conduction du courant a lieu dans les phases liquides et solides, et ce, grâce aux phénomènes suivants (Schneider, 2009).

Le courant se transporter par l'intermédiaire des ions et des complexes ioniques qui s'y trouvent. Il s'agit d'une conduction électrolytique dans la phase liquide. Qui est l'ensemble des constituants du sol, est isolante dans le cas de matériaux électriquement neutres et isolants, ou conductrice dans le cas contraire.

Sensibilité des méthodes géophysiques à l'érosion interne

La compréhension du l'effet d'érosion et leurs modification aux paramètres du sol il faut que les savoir avant l'approfondir dans les méthodes de la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre.

Le transport et la perte de particules fines causent une augmentation de la porosité. C'est une augmentation qui pourrait conduire à une élévation de la perméabilité, participer à une hausse du flux d'infiltration et conduire à l'augmentation de la surface d'infiltration. Johansson et al. (1995) ont montré que l'augmentation de la porosité affecte aussi les paramètres tels que la densité, la vitesse sismique, la permittivité diélectrique, la conductivité hydraulique, la température et la résistivité électrique. En général, la porosité, le flux d'infiltration et la pression dans les pores sont les paramètres physiques indicateurs de la présence d'érosion interne dits paramètres primaires. De l'analyse faite par Johansson, certains paramètres sont plus influencés que d'autres à la variation de ces paramètres primaires. Ainsi le choix porté sur une méthode associée à l'un des paramètres les plus influencés aurait une grande probabilité de détection des signes de l'érosion interne dans le barrage. Il serait donc plus probable que la thermométrie soit plus sensible à la variation du flux d'infiltration qu'aux changements de porosité dans le sol ou que la méthode de résistivité électrique ait une faible sensibilité dûe à la variation de la porosité et du flux d'infiltration (*cité par Tchoumkam, 2010*).

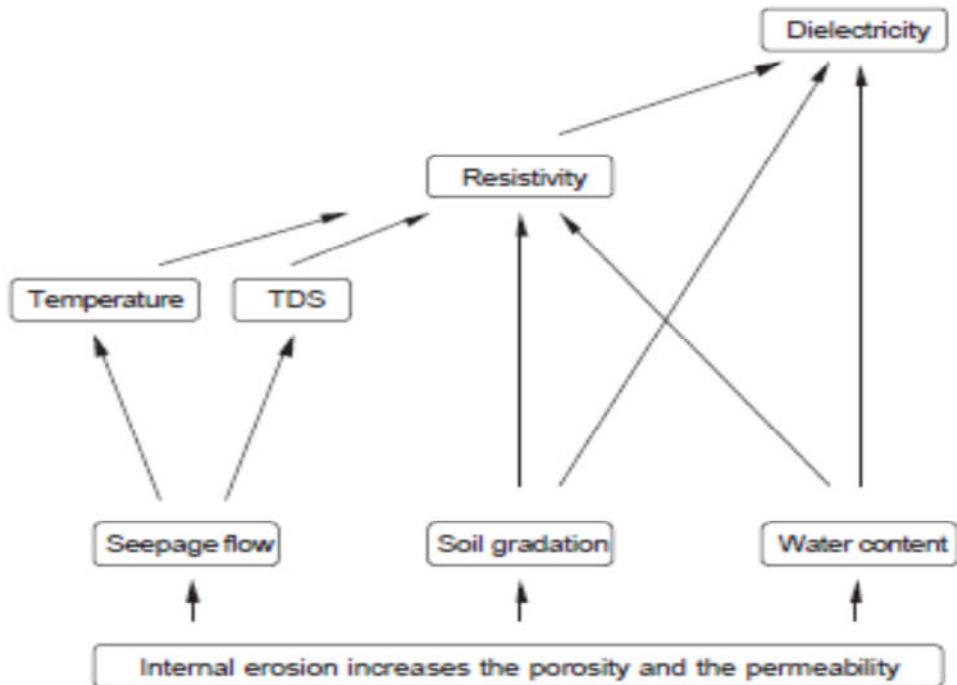


Figure 1.15 : Organigramme présentant les interactions engendrées par le phénomène d'érosion interne sur plusieurs paramètres d'état d'un matériau. (Johansson, 1997).

Principe de la méthode

La résistivité électrique, mesurée en Ohm-mètre ($\Omega \cdot \text{m}$). Elle quantifie l'aptitude du matériau à s'opposer au passage du courant électrique; son inverse, la conductivité électrique, exprimée en Siemens par mètre (S/m).

La résistivité électrique du sol dépend principalement de la porosité, de la saturation et de la composition du sol, notamment sa teneur en argile (Johansson, 1997; Beck, 2008). Ces dépendances font de la mesure de résistivité électrique une méthode de caractérisation des sols utilisée en géotechnique (Cunat, 2012).

Le principe de la méthode consiste à injecter un courant électrique continu ou alternatif à basse fréquence dans le sol à l'aide de deux électrodes. Deux autres électrodes, également implantées dans le sol, permettent de mesurer la différence de potentiel. Les quatre électrodes forment un quadripôle schématisé Figure 1.16 La mesure de potentiel couplée à la mesure d'intensité I (Ampère) du courant injecté permet de mesurer la résistivité apparente du sol ρ_a :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1.1)$$

Cette dernière est proportionnelle au rapport de la différence de potentiel sur l'intensité du courant injecté. Le coefficient de proportionnalité K est un facteur géométrique fonction du positionnement des électrodes (Parasnis, 1996; Kunetz, 1966). La profondeur d'investigation

des méthodes électriques varie en fonction de l'espacement inter-électrodes et est de l'ordre de 1/6ème à 1/8ème de la longueur du dispositif (Mériaux, 2004).

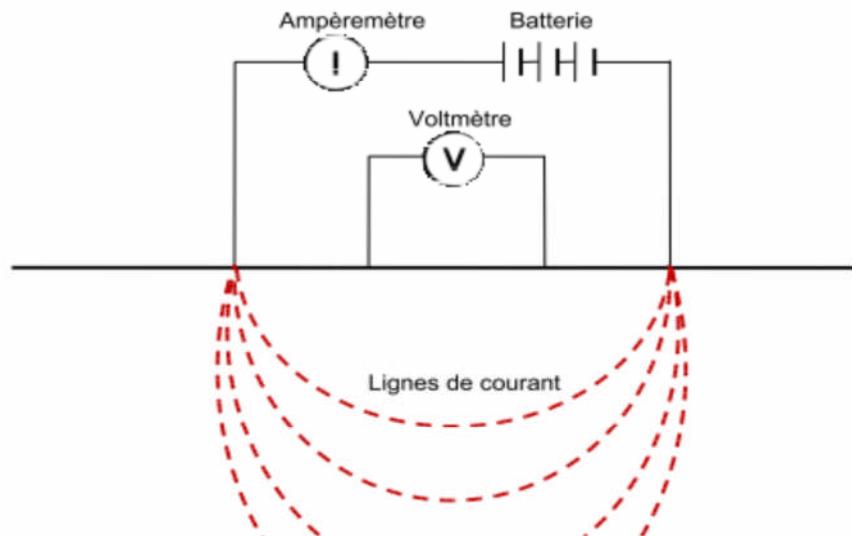


Figure 1.16 : Principe de mesure de la résistivité du sol: le quadripôle d'électrodes
(Cunat, 2012).

Types de mesures utilisées pour les digues

La prospection du champ de résistivité d'une zone peut être réalisée par différentes méthodes :

- ✓ le traîné électrique : la taille du réseau d'électrodes est fixe (espace inter-électrodes constant) mais est déplacé sur toute la zone de prospection ;
- ✓ le sondage électrique : après chaque mesure, les électrodes sont progressivement éloignées les unes des autres pour augmenter l'épaisseur de terrain prise en compte ;
- ✓ le panneau électrique : c'est une combinaison des deux méthodes précédentes. Des électrodes sont implantées sur toute la zone d'investigation. Le panneau peut être déployé en travers de l'ouvrage ou en long. Une électrode peut à la fois jouer le rôle d'injection ou de mesure de potentiel. La mesure est pilotée par un ordinateur qui réalise la combinaison des interrogations. Dans le cas des digues, qui présentent un caractère hautement 3D entraînant la formation d'artéfacts dans les résultats d'imagerie conventionnelle (1D ou 2D), des électrodes perpendiculaires au profil en long peuvent être utilisées.

1.5 Conclusion

Cette partie de recherche bibliographique a permis d'approfondir plus et de connaître l'érosion et ses différents types : interne, la surverse d'une part, et la dispersion des argiles d'autre part.

Le phénomène d'érosion interne est engendré par les écoulements internes dans les ouvrages en terre qui arrachent et transportent une fraction des grains constitutifs du massif. Ces mécanismes sont responsables de la rupture d'ouvrages en terre récents. L'érosion interne est difficilement détectable sur site en raison de sa complexité et son caractère fortement évolutif. Il est donc nécessaire de mener une étude paramétrique de l'érosion interne dès son initiation.

L'érosion externe ou surverse c'est un phénomène naturel qui se produit lorsque l'eau dépasse le haut niveau du massif, ce qui conduit à la brèche directement et rapidement par l'érosion régressive.

L'effet de courant hydraulique peut créer des érosions au fond de la digue qui résulte une diminution de la pente locale qui accompagne à une fatigue dans les caractéristiques mécaniques qui engendre le phénomène du glissement.

2. Chapitre II –METHODOLOGIE DE LA CARACTERISATION DE L'EROSION ET DE LA DISPERSION.

2.1 Introduction

L'identification est une étape préliminaire dans l'ensemble des travaux de génie civil. Elle consiste dans chaque projet de faire une étude d'identification au cours des différentes phases de la réalisation de ce projet.

Cette caractérisation est insuffisante pour notre problème de dispersion des argiles ils doivent assurer une étude complémentaire qui contient certaine nombre d'essais.

Les argiles dispersifs provoquent des catastrophes importantes ce qui exige une étude spéciale et profonde similaire à celle décrit au chapitre précédent.

Nous nous intéressant dans ce chapitre d'abord de donner une revue globale sur les essais conventionnels tel que : la granulométrie, les limites d'Atterbeg, la teneur en carbonate et la valeur bleu de méthylène des sols étudiés, ensuite on expliquant les essais de différents types d'érosion externe, interne et l'affouillement en mettant l'accent sur les difficultés de mis en œuvre et les éléments nécessaire à la compréhension de ce phénomène dit dispersion des argiles.

2.2 Caractérisation de l'érosion

2.2.1 Essais d'érosion interne

2.2.1.1 Essai d'érosion de trou (Hole Erosion Test)

Ce type d'essai consiste à faire circuler un écoulement dans un trou préformé de l'échantillon à l'instar du pinhole test avec cependant un suivi instrumenté de l'essai. Grâce aux paramètres mesurés et estimés tels que le débit, le gradient hydraulique et l'évolution du diamètre du trou, la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion peuvent être dérivés.

La Figure 1 montre un schéma d'appareillage de Hole Erosion Test (HET) développé par Wan et Fell (2004).

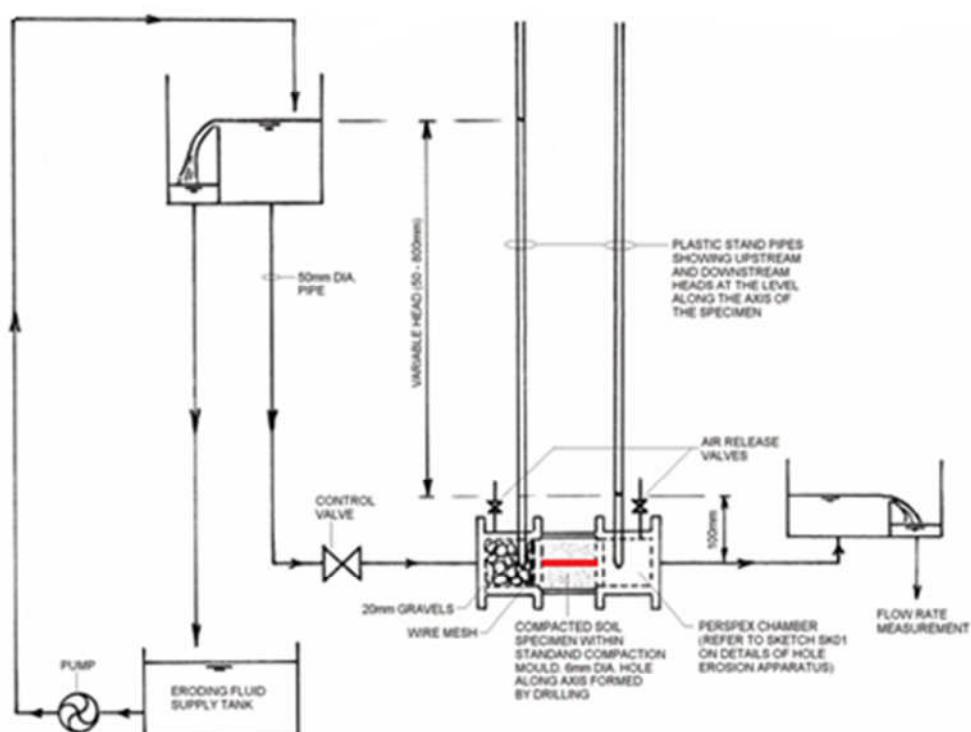


Figure 2.1 : Schéma d'appareillage de Hole Erosion Test (Wan et Fell, 2004).

Christensen et Das (1973) ont étudié l'influence de la contrainte de cisaillement, de la durée de l'essai, de la teneur en eau, de la température sur l'érosion du mélange (kaolinite /sable). Ils ont trouvé que l'érosion augmente linéairement avec la contrainte de cisaillement et la durée de l'essai. Le taux d'érosion diminue avec l'augmentation de la teneur en eau et de la température. Le taux d'érosion dépend fortement du type d'argile et son pourcentage.

Wan et Fell, 2004, ont travaillé sur les matériaux du noyau des barrages. Leur étude portait sur la résistance à l'érosion des 14 types de matériaux constitutifs du noyau des barrages. Un «indice du taux d'érosion» a été introduit pour classifier la résistance à l'érosion. Une méthode simple a été proposée pour estimer la vraisemblance de l'érosion interne et du renard

dans les barrages en terre. Cependant le choix fait pour estimer la contrainte de cisaillement critique est discutable.

2.2.1.2 Essai triaxial d'érosion (« Triaxial Erosion Test »)

Sanchez *et al.* (1983) ont mené des essais sur les matériaux de cinq barrages en terre grâce à l'appareil triaxial d'érosion (modifié à partir de l'appareil triaxial normal) (Figure 2.2). Afin de calculer la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion, ils devaient faire une hypothèse sur l'évolution de la forme du trou préformé dans l'échantillon. Ils ont trouvé que la teneur en eau a une influence sur l'érosion d'un sol type limon plus importante que sur un sol de type argileux. L'augmentation de la significativement que dans le cas d'un sol argileux.

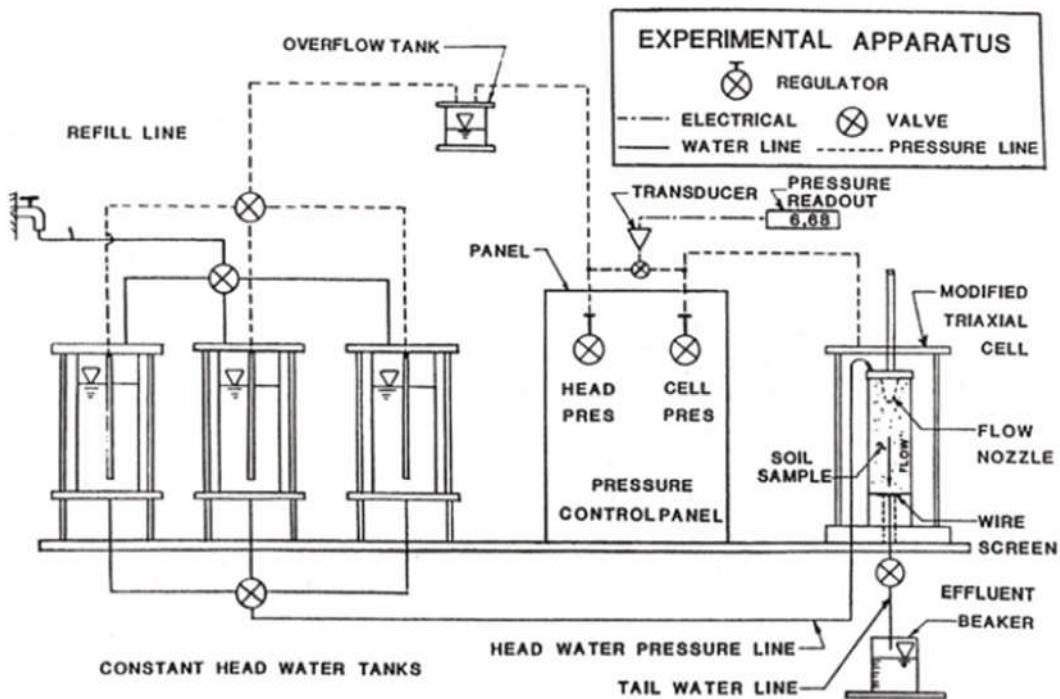


Figure 2.2 : Schéma d'appareillage de Triaxial Erosion Test (Sanchez et al., 1983)

Bendahmane (2005) ont mis en évidence l'existence d'un second gradient critique correspondant à une érosion interne par renard après initiation de l'érosion par suffusion. La diminution du pourcentage d'argile et de la pression de confinement amplifie la suffusion. La diminution du pourcentage d'argile et l'accroissement de la pression de confinement amplifiée phénomène de renard (Marot *et al.* 2007).

2.2.2 Essais d'érosion externe

2.2.2.1 Erodimètre a Jet Mobile

L'érosion que subit un sol pendant une période donnée est un phénomène d'arrachement et de transport des particules du sol superficiel. Elle est due à l'action des forces destructrices du climat, qui peuvent être éoliennes, mais qui sont surtout hydriques (pluies, ruissellement). Par

définition, l'érosivité **R** du climat est une grandeur qui représente la plus ou moins grande puissance d'arrachement et de transport, que possèdent les forces érosives, pendant la période considérée. Les pertes par érosion ou "érosion" dépendront à la fois de l'érosivité **R** et de l'aptitude globale du sol superficiel à se faire attaquer par les agents de l'érosion. Cette aptitude du sol est appelée érodabilité au sens large. On écrira avec Hudson (1981) :

Érosion **E** = Érosivité **R** x Érodabilité au sens large.

Pour mesurer cette érodabilité, il suffit donc en principe de fixer l'érosivité **R** et de mesurer **E**. Le problème qui se pose est alors d"artificialiser et de fixer la force destructrice des agents de l'érosion, c'est-à-dire l'érosivité **R**. Cela peut se faire à l'aide d'appareils de pluie artificielle de grandes dimensions, mais ces appareils sont difficiles et longs à exploiter. Nous avons donc conçu et réalisé un appareillage maniable et modulable dans lequel on peut faire varier puis rendre constante l'érosivité **R** et que l'on peut utiliser rapidement aussi bien au laboratoire que sur chantier sur des surfaces ayant au maximum 15,2 cm de diamètre.

L'érodabilité au sens large, pour un sol donné, dépend de plusieurs facteurs : la topographie de la surface (pente et longueur), les contrôles superficiels de l'érosion par compactage, traitements chimiques ou végétalisation, par exemple. Auparavant, nous allons décrire l'appareillage utilisé et les différentes modalités de son utilisation.

Description de l'appareillage

L'érodimètre à jets mobiles est constitué d'une partie mécanique, appelée "érodeur", et de différents organes de service ou de contrôle de l'érosion, tous aisément transportables.(Hénensal et Duchatel, 1990).

L'érodeur est la partie essentielle de l'appareillage. Il projette perpendiculairement au sol ou à l'échantillon de sol dont on veut mesurer l'érodabilité, six jets d'eau de caractéristiques semblables et bien définies. Ces jets sont animés d'un mouvement circulaire uniforme dans une chambre de pluie de 15,2 cm de diamètre intérieur (diamètre du moule CBR). Ils proviennent de gicleurs portés par un bras en rotation à vitesse constante (5 tr/min).

L'érodeur est relié par un tuyau souple à un réservoir d'eau sous pression constante, lui-même relié à une source d'air comprimé contrôlée à l'aide d'un régulateur.

Suivant l'essai particulier qui est conduit, les eaux de ruissellement contenant les produits arrachés au sol sont soit non recueillies, soit recueillies.

Quand le ruissellement n'est pas recueilli, l'essai d'érodabilité peut s'effectuer sur un échantillon dont la surface à éroder est nettement inférieure à la section intérieure de l'érodeur. Cet échantillon a la forme d'une briquette parallélépipédique (10 x 5 x 2,5 cm). La briquette de sol est fabriquée dans un moule à l'aide d'un piston sur lequel on peut appliquer des pressions considérables. On introduit dans le moule la quantité de sol nécessaire à l'obtention d'une densité recherchée et on laisse agir le piston tant que la hauteur imposée (2,5cm) n'est pas atteinte. Une fois sortie du moule, la briquette est placée sous l'érodeur de

façon toujours identique par rapport à l'axe de l'appareil. Le ruissellement n'étant pas recueilli, il est évidemment nécessaire de peser la briquette avant et après essai (poids sec). La différence des poids obtenus donne directement la perte par érosion.

Le recueil des eaux de ruissellement est indispensable quand le poids sec des matériaux avant et après essai ne peut pas être mesuré ou est difficile à obtenir. Ce recueil se fait différemment au laboratoire et in situ:

- Au laboratoire, les eaux sont recueillies par simple gravité. La mesure de l'érodabilité se fait alors sur une galette de sol de 15,2 cm de diamètre et 6 cm d'épaisseur, que l'on a compactée dans un moule porte-échantillon. de la même façon que dans un moule Proctor modifié;
- Sur le terrain on délimite l'aire d'essai de 15,2 cm de diamètre à l'aide d'une trousse coupante enfoncee d'environ 1 cm dans le sol. A l'aval de la ligne de plus grande pente de cette aire d'essai, un béquet permet l'aspiration des eaux de ruissellement grâce à un tuyau relié à un flacon de réception. Pour assurer l'aspiration, on provoque un vide partiel dans le flacon à l'aide d'une pompe électrique.

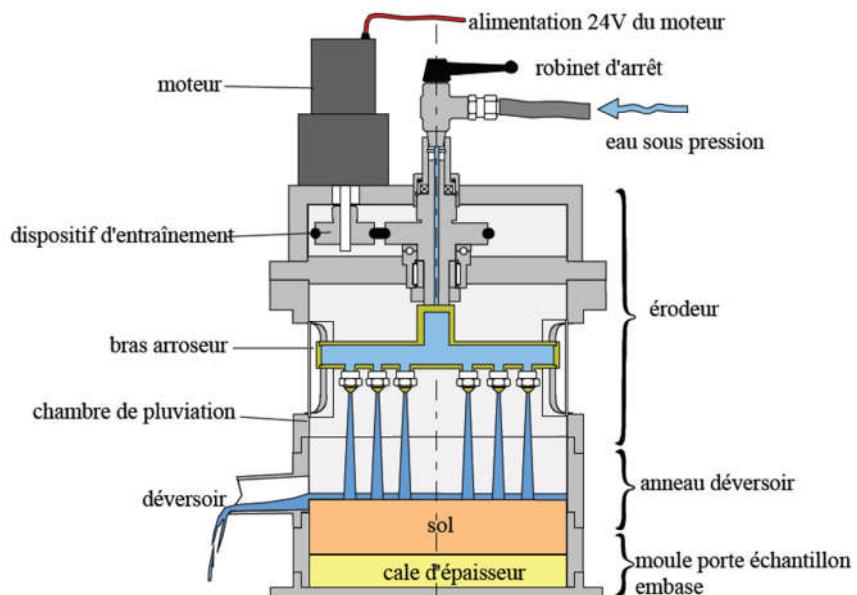


Figure 2.3 : Schéma de l'essai d'érosion par érodimètre LCPC (Henensal et al., 1987)



Figure 2.4 : Appareillage d'érodimètre à jets mobiles.

2.3 Caractérisation de la dispersion

2.3.1 Essai à l'aiguille «Pinhole Test»

Un nouveau test de laboratoire a été développé pour la mesure directe de l'érodabilité des sols à grains fins, en utilisant un flux d'eau à travers un petit trou dans un échantillon. L'objectif principal est l'identification fiable et une meilleure compréhension des argiles dispersives, qui sont responsables des dommages de l'érosion grave et la rupture de barrages de terre et d'autre structures. Après l'effort considérable expérimental une distinction de test a été trouvée qui donne de manière fiable de résultats reproductibles et une distinction entre les argiles dispersives et non dispersives. Pour l'argile dispersive, l'eau qui coule à travers le trou porte une suspension de colloïdes de couleur trouble, alors que l'eau qui traverse l'argile résistant à l'érosion, l'eau est limpide.

Par rapport au crumb test, le double hydromètre test et l'analyse chimique des eaux interstitiels, le pinhole test donne les meilleures corrélations entre les résultats de l'essai et la manifestation de l'érosion dans la nature. Cette méthode d'essai modélise l'écoulement du fluide dans une fissure ou un canal formé dans le massif du remblai. Il permet d'étudier le problème du renard dans les barrages en terre homogènes, de l'érosion le long d'un canal ou d'une berge du canal, etc. Le dispositif est présenté sur la figure 2.5.

Le « Pinhole Test » est une méthode qui permet d'obtenir des mesures qualitatives directes de l'érodabilité interne des sols argileux. Les résultats sont basés sur l'analyse d'une centaine d'échantillons testés, prélevés sur des remblais et canaux susceptibles d'être érodés.

Ces tests ne sont pas applicables aux sols qui ont moins de 12% de fines ($< 5 \mu\text{m}$) et dont la plasticité est inférieure ou égale à 4. De plus, les résultats obtenus sont uniquement d'ordre qualitatif.

Les mesures se basent sur la teinte de l'effluent prélevé au cours du test. Il s'agit de former un canal à l'aide d'une aiguille dans un échantillon d'argile, compacté à 95% de l'optimum Proctor, et d'exercer différentes pressions d'eau à l'intérieur du canal pour simuler des écoulements internes. À la sortie du dispositif, la teinte de l'eau prélevée, le débit de sortie et la taille du canal en fin de test sont analysées. Ces données permettront de déterminer la dispersivité du sol selon la classification proposée dans la norme. En fonction de la méthode A, B ou C choisie (voir les détails dans la norme), les appréciations sont :

Méthode A : les critères de classification des sols dispersifs sont :

- Très dispersive, D1 : après 5 min sous une charge hydraulique de 50 mm, l'eau de sortie est très sombre, le débit d'écoulement est compris entre 1 et 1,4 ml/s et le diamètre final est supérieure ou égale à 2 mm
- Dispersive, D2 : après 10 min sous une charge hydraulique de 50 mm, l'eau de sortie est sombre, le débit d'écoulement est compris entre 1 et 1,4 ml/s.

- Moyennement dispersive, ND4 : après 10 mn sous une charge hydraulique de 50mm, l'eau est légèrement sombre, le débit d'écoulement est augmenté rapidement et compris entre 0,8 et 1 ml/s.
- Moyennement dispersive, ND3 : après 5 mn sous une charge hydraulique soit de 180 mm, l'eau est légèrement sombre, le débit d'écoulement est compris entre 1,4 et 2,7 ml/s; ou soit de 380 mm, l'eau est légèrement sombre, le débit d'écoulement est compris entre 1,8 et 3,2 ml/s et le diamètre final est entre 1,5 et 2 mm.
- Non dispersive, ND2 : après 5 mn sous une charge hydraulique de 1020 mm, l'eau est complètement claire avec l'apparition des particules à peine visible, et le débit d'écoulement est supérieur à 3 ml/s.

Non dispersive, ND1 : après 5 mn sous une charge hydraulique de 1020mm, l'eau est complètement claire, et le débit d'écoulement est moins de 3 ml/s.

Méthode B : les critères de classification des sols dispersifs sont :

Dispersive, D : sous une charge hydraulique de 50 mm, l'eau recueillie est très sombre, le diamètre final du trou est supérieur à 1,5 mm.

Moyennement dispersive, SD : sous une charge de 180 mm ou 380 mm, l'eau est légèrement sombre et le diamètre du trou final est supérieur ou égale à 1,5 mm.

Non dispersive, ND : sous une charge de 380 mm, l'eau recueille est claire et le diamètre final du trou est inférieur à 1,5 mm.

Méthode C : similaire à la méthode A avec quelques modifications apportées à la classification :

- ND4 : après 5 min sous une charge de 180 mm, l'eau recueille est modérément sombre et le débit d'écoulement est compris entre 2 et 2,8 ml/s.
- ND3 : après 5 min sous une charge de 380 mm, l'eau recueille est légèrement sombre à claire et le débit d'écoulement est compris entre 2,4 et 3,2 ml/s.
- ND2 : après 5 min sous une charge de 380 mm, l'eau recueille est légèrement sombre à claire et le débit d'écoulement est compris entre 1,6 et 2,4 ml/s.
- ND1 : après 5 min sous une charge de 380 mm, l'eau recueille est complètement claire et le débit d'écoulement est compris entre 1,8 et 1,6 ml/s.

La méthodologie de classification des sols dispersifs à partir de la méthode A de l'essai de trou d'épingle est résumée sur la figure

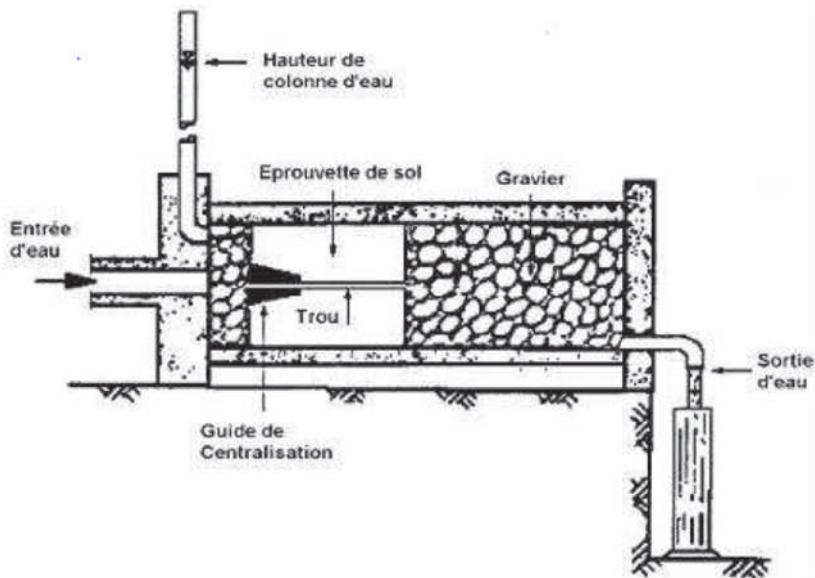


Figure 2.5 : Schéma de principe de Pinhole Test (d'après ASTM D4647-06)

Cette méthode présente cependant quelques limitations :

- ✓ La difficulté d'interprétation des résultats repose sur la difficulté d'évaluation de la section exacte du trou pendant l'essai, la couleur de l'eau à la sortie de l'essai est appréciée à l'œil nu par l'opérateur de manière qualitative et subjective. Ainsi, cette méthode n'offre pas la possibilité de caractériser l'évolution du phénomène.
- ✓ Le sol ayant une teneur en sodium élevé ($>80\%$) et une faible teneur globale en sels dissous ne se montre pas dispersif dans le Pinhole test alors que dans les faits, il est dispersif. C'est à cause sans doute de la diminution du gradient de concentration qui s'installe entre l'eau interstitielle et l'eau du fluide érodant (de type eau distillée) qui diminue le taux d'érosion du sol.

2.3.2 Essai d'émiettage «Crumb Test»

Le Crumb Test est un essai pour mesurer la dispersion du sol. Il a été développé à l'origine par Emerson en 1964, et s'intitulait alors 'essai de cohésion des agrégats'. L'essai considère sept catégories de dispersion pour classer les sols. Sherard *et al.*, 1977 a simplifié l'essai en combinant certaines catégories pour limiter leur nombre à 4. L'essai est ensuite entré dans la norme ASTM D6572-00.

Le Crumb Test est un essai très simple et aisément reproductible. Il donne une bonne et rapide indication sur la dispersion de l'argile. L'essai n'est pas coûteux, il ne demande pas des appareils complexes et il peut être utilisé dans n'importe quel laboratoire ainsi que sur site.

Cependant comme l'essai se base sur l'observation, l'indication donnée est qualitative.

Les résultats dépendent en effet de la couleur de l'argile, de la lumière dans le laboratoire mais aussi de l'opérateur. Une autre limite du Crumb Test vient du fait que cet essai n'est applicable qu'aux sols dont la plasticité est supérieure à 8%.

Le Crumb test consiste à immerger un cube de sol remanié de petite taille (15 mm de côté) dans un volume d'eau distillée beaucoup plus important (250 ml). L'échantillon est posé sur le fond d'un récipient cylindrique, à côté du bord. La tendance des particules du sol à se disperser en suspension colloïdale est estimée par observation du nuage formé à 2 minutes, 1 heure et 6 heures. Selon le degré de turbidité du nuage, le sol est classé dans un des quatre niveaux de dispersion suivants (Figure 2.6) :

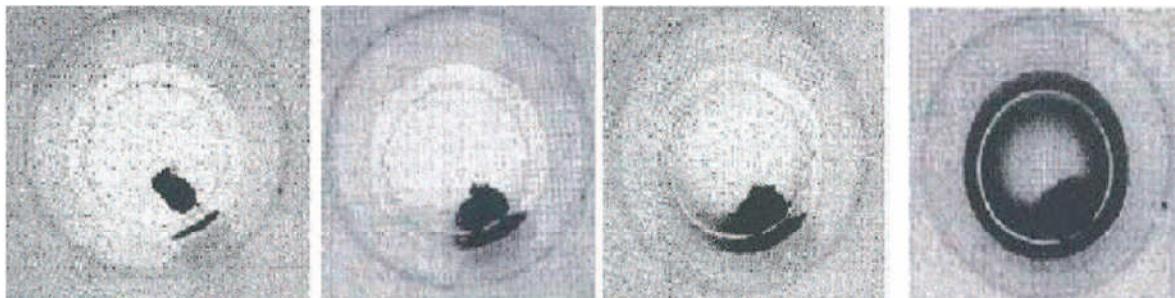


Figure 2.6 : Essais typiques de « Crumb test », a) niveau 1 : non dispersif, b) niveau 2 : intermédiaire, c) niveau 3 : dispersif, d) niveau 4 : très dispersif (source ASTM D6572-00).

Niveau 1 – Non dispersif : il ne se produit pas de réaction entre le sol et l'eau. Le sol se désagrège, diffuse et déborde mais aucune turbidité n'est observée autour de l'échantillon.

Toutes les particules sédimentent pendant la première heure.

Niveau 2 – Intermédiaire : il se produit une réaction légère avec la formation d'une suspension colloïdale de faible turbidité. Il s'agit d'un niveau intermédiaire : si le nuage de suspension est visible facilement, le sol est classé dans le niveau 3. Si le nuage n'apparaît que dans une zone restreinte, le sol est classé dans le niveau 1.

Niveau 3 – Dispersif : il se produit une réaction modérée. Le nuage de suspension colloïdale est facilement observable autour de l'interface entre le sol et l'eau. Le nuage peut s'étendre jusqu'à 10 mm de l'échantillon.

Niveau 4 – Très dispersif : il se produit une réaction forte. Un nuage dense de suspension colloïdale est observé sur toute la surface du fond du récipient. Quelque fois, il peut s'étendre de manière telle qu'il n'est plus possible de distinguer l'interface entre l'échantillon et la suspension colloïdale.

2.3.3 Essai sédimentométrique en parallèle «Double Hydrometer Test»

L'idée de l'essai du Double Hydromètre Test a été donnée par Volk en 1937 mais c'est en 1972 que la première procédure d'essai est présentée par Sherard. L'essai a été normalisé sous le nom ASTM D4221-99. Une étude paramétrique des floculants et des précipités d'un sol dans différents liquides avec ou sans défloculants a été réalisée en 1988 au LCPC (Hénensal, 1988).

Comme les études sur le problème d'érosion et de dispersion de sol montrent que la fraction des particules fines a un rôle significatif, l'idée de la méthode est de comparer la tendance

des particules fines d'un sol à sédimenter respectivement dans l'eau distillée sans agitation mécanique (sédimentation normale) et dans une solution défloculante avec agitation mécanique (sédimentation dispersée). La différence entre ces deux types de sédimentations montre la tendance à la dispersion naturelle du sol examiné.

L'essai consiste à déterminer le pourcentage de particules de sol de diamètre inférieur à $5\mu\text{m}$ dans deux suspensions identiques ($5\mu\text{m}$ est considéré comme la limite supérieure de la taille des particules d'argile à l'époque où la méthode a été rédigée). Une des suspensions est dispersée par agitation mécanique avec un défloculant (hexamétaphosphate de sodium) et l'autre est dispersée sans défloculant sans agitation mécanique (Figure 2.7). Le dispositif est montré sur la Figure 2.8

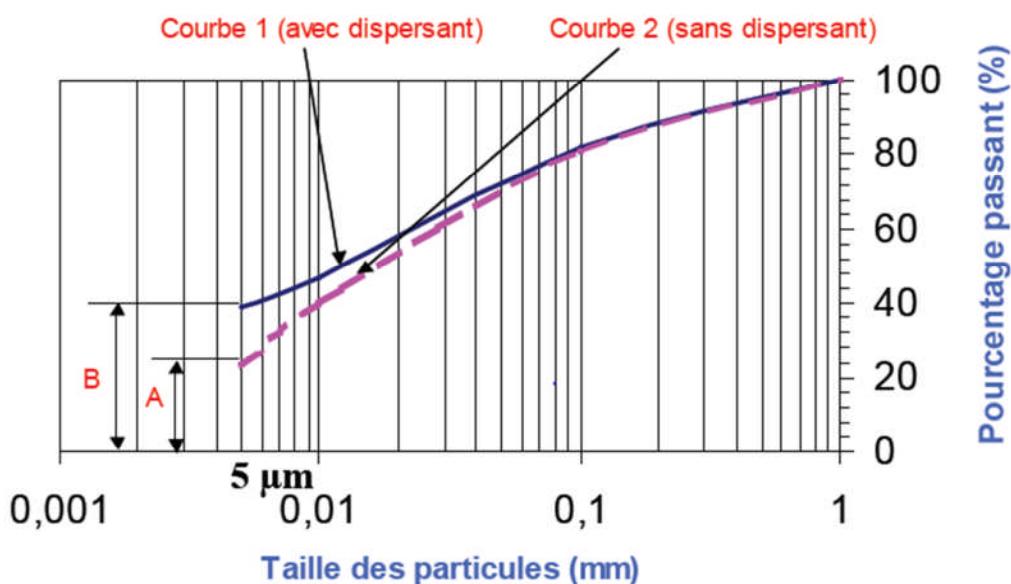


Figure 2.7 : Courbes granulométrique de l'essai de double sédimentation.



Figure 2.8 : Dispositifs du Double Hydrometer Test.

Si D est proche de 100%, le sol est complètement dispersif, autrement dit, l'argile déflocule naturellement dans l'eau. En revanche, si D est très faible (proche de zéro) le matériau est non-dispersif, c'est-à-dire que l'argile reste floculée en condition normale (sans agent dispersant et sans agitation mécanique) dans l'eau. Il est défini par :

$$D = \frac{\% \text{ fines} < 5\mu\text{m}(\text{sans dispersant})}{\% \text{ fine} < 5\mu\text{m}(\text{avec dispersant})} * 100$$

Tableau 2.1 : Classification de la dispersion des sols (Sherard et al., 1976a).

% Dispersion	Etat de sols
D < 30%	Non dispersif
30% < D < 60%	Probablement dispersif
D > 60%	Dispersif

2.3.4 Essai Chimique

Pendant les années 1960, des chercheurs australiens ont reconnu la présence de sodium échangeable comme principal un facteur contributif chimique au comportement de l'argile dispersif (Aitchison et Wood, 1965 ; Ingles et bois, 1964a ; Rallings, 1966). Le paramètre de base de quantifier cet effet est ESP (sodium échangeable pourcentage), où:

$$ESP = \frac{\text{exchangeabk sodium}}{\text{CCE}} \times 100$$

CCE : Capacité d'échange cationique.

Les Critères qui ont été utilisés pour classer les argiles dispersives en utilisant les données ESP sont présentés dans le tableau 2.2

Tableau 2.2 : Classification de la dispersion des sols (Knodel, 1991)

ESP	Degré de dispersion
< 7	Non dispersif
7 à 10	Intermédiaire
> 10	Dispersif

Un autre paramètre couramment évaluée pour quantifier le rôle de sodium par rapport à la dispersion lorsque les sels libres sont présents est le SAR (taux d'absorption de sodium) de l'eau interstitielle où

$$SAR = \frac{Na}{0,5 (Ca + Mg)}$$

Unité de meq/l

La méthode SAR n'est pas applicable si il n'y a pas de sels libres présentent. Utilisation de la SAR est basée sur le fait que les sols dans la nature sont en équilibre avec leur environnement.

En particulier, il existe une relation entre la concentration de l'électrolyte de l'eau interstitielle du sol et les cations échangeables dans la couche adsorbée de l'argile.

Des chercheurs australiens ont démontré que tous les sols étaient dispersifs si le SAR dépasse 2. Cela est applicable pour les sols qui contiennent une TDS (Total dissolved salts) entre 0,5 et 3 meq/L,

Pourcentage de Sodium PS = $Na \times 100 / TDS$

Avec TDS = $Na + Ca + Mg + K$ (meq/l)

Pour obtenir l'extrait de saturation, le sol est mélangé avec de l'eau distillée jusqu'à coller un sol saturé d'eau contenu proche de la limite de liquide Atterberg est obtenu. La pâte est laissé au repos pendant un certain nombre d'heures jusqu'à ce que l'équilibre est atteint entre les sels dans l'une des eaux de pores < 1 those sur le complexe d'échange de cations. Ensuite, une petite quantité d'eau interstitielle est filtré à partir de la pâte de sol avec un aspirateur. Cet extract l'eau des pores est testé en utilisant des tests chimiques de routine

Pour déterminer les quantités des principaux cations métalliques : le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium, en termes de milliéquivalents par litre. Les analyses chimiques sont effectuées en utilisant procédures suivant :

- ❖ Spectrophotomètre de flemme pour les cations : K^+ et Na^+ ;
- ❖ Spectrophotomètre d'absorption atomique : Ca^{++} et Mg^{++} .

Les paramètres déterminés par cette analyse peuvent identifier le domaine de dispersion des sols fins, en se basant sur l'abaque de shérard en 1976 (figure 2.9):

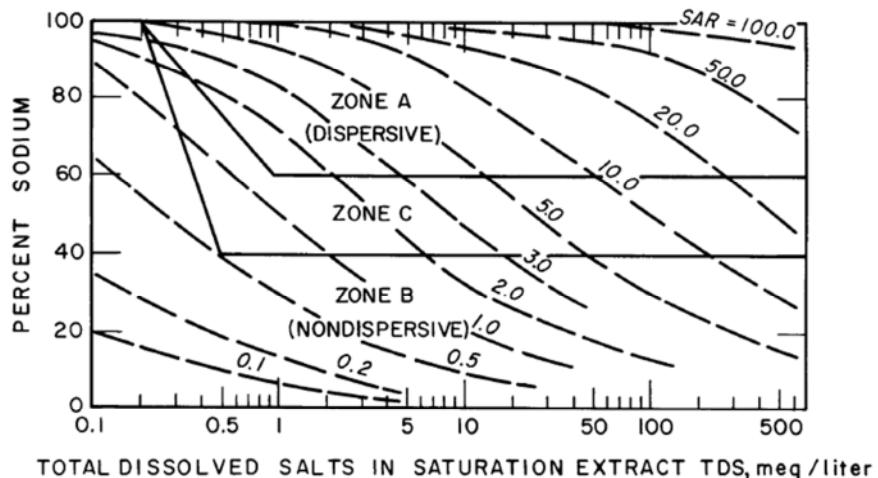


Figure 2.9 : Corrélation entre les essais chimiques et le Pinhole test (Knodel, 1991)

Une autre classification des sols dispersifs est basée sur l'analyse chimique de l'extrait de saturation et la mesure de la conductivité hydraulique. Dans cette méthode, le pH de l'extrait de saturation est mesuré et les paramètres de dispersivité ESP et SAR sont calculés. La figure 2.10 donne la procédure établie par Knodel en 1991 pour déterminer les classes de dispersion, en se basant sur la conductivité électrique, les paramètres de dispersivité et le pH de l'extrait de saturation.

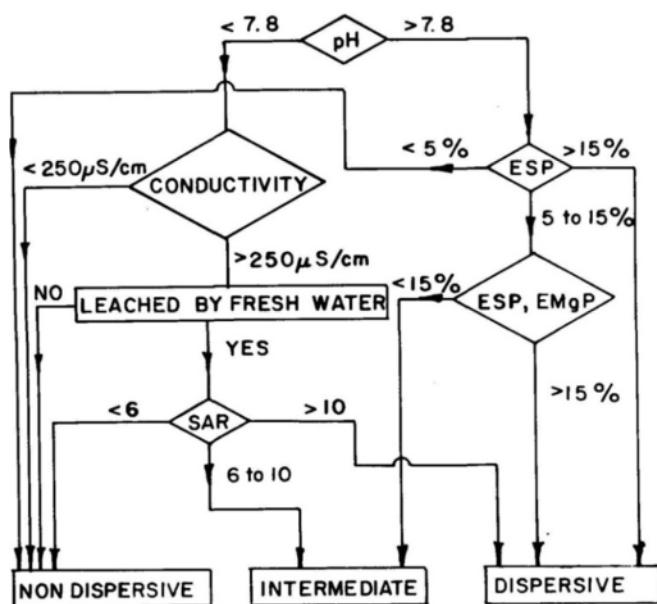


Figure 2.10 : Potentiel dispersif évalué à partir de l'analyse des sels dissous en eau interstitielle

2.4 Conclusion

Les essais qu'on a décrits dans ce chapitre sont nécessaires dans l'étude de la caractérisation de ce phénomène d'érosion, ces techniques expérimentales seront appliquées par la suite dans le cadre d'une étude de quatre sols fins.

Il est clair qu'il existe plusieurs techniques avec plusieurs suggestions, ce qui implique que l'ingénieur est confronté à un problème de choix. Ce dernier dépend de plusieurs paramètres.

3 CHAPITRE III : IDENTIFICATION ET CARACTERISATION D'UN SOL DISPERSIF

3.1. Introduction

Le présent chapitre vise la mise en œuvre des techniques citées dans le chapitre précédent pour la caractérisation de la dispersion des sols de la région de Tlemcen.

On a fait une étude expérimentale sur quatre sols fins de différents nature prélevés à la pelle mécanique soit des échantillons de classe 4 totalement remaniés, situés dans différents endroits de la wilaya de Tlemcen en Algérie.

La partie d'identification a été réalisée en totalité au niveau du laboratoire de travaux publics d'ouest (LTPO).

Cependant le reste des essais de caractérisation ont été effectués au de laboratoire de l'université de Tlemcen (Faculté de Technologie) à savoir : Hydrometer test, Crumb test et Pinhole test).

3.2. Situations des matériaux

Nous avons travaillé sur quatre sols :

Le premier sol

Le talus touché par le glissement surplombe en côté droit de la route nationale N°02 (RN02) venant du Tlemcen et allant jusqu'au limite Wilaya de Ain Temouchent au PK 16+100.

Du point de vue topographique, le talus, objet du glissement, constituait à l'origine, une partition du versant du thalweg de l'Oued Amieur qui déversait en barrage Sekak, sur le coté gauche en allant vers le Village de Amieur.



Figure 3. 1: Extrait de la carte topographique de la Wilaya de Tlemcen.



Figure 3. 2 : Situation de la zone d'étude.

Résultats de la reconnaissance

D'après la carte géologique interprétative de l'Algérie à l'échelle de 1/200 000 et celle de la région de Bensekran, à l'échelle 1/500.000^e, le terrain où se trouve le glissement, s'intègre dans la plaine des Ghossels, elle est caractérisée par des formations sédimentaires de Miocène moyen (M₂₋₃ sur la carte) représentée par des argiles, marnes, et des grés confirmant ainsi les configurations géologiques des sols rencontrés par les sondages carottés.

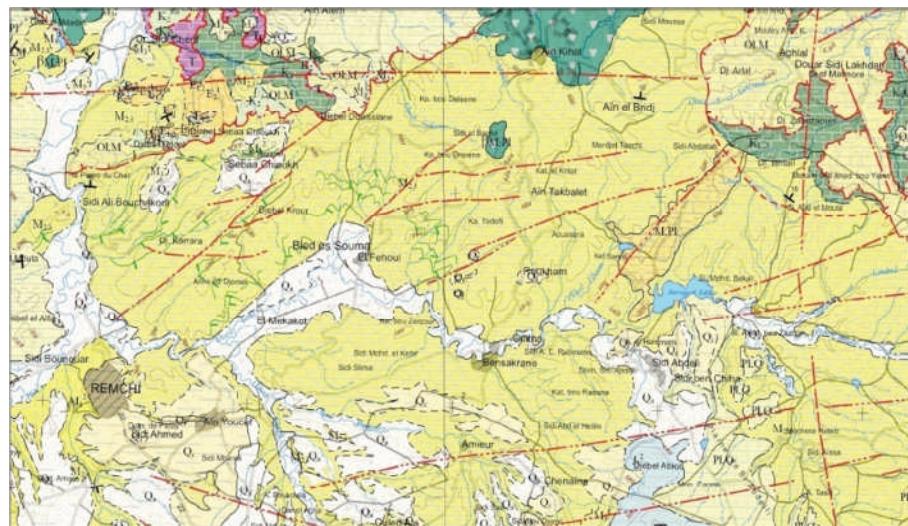


Figure 3.3 : Extrait de la carte géologique interprétative de Nord de l'Algérie 1/200 000.

❖ Description géologique du talus glissé (photo 3.1):

Sur le plan lithostratigraphique, notre analyse du talus nous a révélé l'existence d'une marne verdâtre à grisâtre, pâteuse à mi-raide par endroit, sableuse, masquée par une couche de terre végétale d'une profondeur centimétrique.





Photo 3. 2: Présentation photographique des faciès lithologiques qui caractérisent le talus.

Le deuxième échantillon

Ce dernier est prélevé d'un glissement de type circulaire ayant affecté le talus qui supporte les deux bretelles d'accès et sortie de la trémie de la ville de Hennaya située en côté Sud.

Le talus affecté comprend le soubassement en sol originel argilo-marneux surmonté par un remblai et le corps de chaussée. Le talus dans son ensemble s'élève sur une hauteur de 7.0 mètres.

Vu en plan, le glissement produit fait apparaître une ligne de rupture principale en forme de demi cercle suivie parallèlement par autre ligne de rupture assez importante déclenché en tête du talus, avec d'autres fissures intercalaires de jonction allant toutes en dégradation par rapport à la première qui présente l'ouverture et l'escarpement le plus important (voire 1,65m de hauteur après stabilisation.)



Photo 3.3 : Les désordres de la trémie du Hennaya.

L'examen visuel détaillé de la section endommagée a permis de montrer que le mouvement de sol (ou glissement) ayant affecté le talus supportant les bretelles a été engendré par l'effet des infiltrations d'eau de pluie en sous remblai et leur écoulement sur le toit argileux du sol support originel.

En effet, d'après les constatations, les traces restantes et les informations recueillies en place, les eaux de ruissellement des fortes dernières pluies déversées sur le site n'ont pas été drainées convenablement jusqu'en bas du talus ont stagné longtemps dans la cuvette de jonction des deux talus de la RN22 et des bretelles, le temps de s'infiltrer gravitairement dans le remblai perméable jusqu'au niveau du toit argileux.



Photo 3. 4 : Détail de la section endommagée.

Le troisième échantillon

Il est prélevé du sondage réalisé sur site qui a mis en évidence les formations géologiques décrites ci-après :

1. Sondage SP.3:

0.00m à 1.60m : remblai argileux ;

1.60m à 5.50m : marne beige à jaunâtre sableuse à graveleuse, concrétionnaire par endroit ;

- 5.50m à 6.90m : argile marron foncée, concrétionnaire, pâteuse à mi- raide ;
- 6.90m à 13.90m : marne marron en surface devenant grisâtre à partir de 8,00 m, pâteuse à mi- raide.
- 13.90m à 15.00m : grès jaunâtre à brunâtre altéré en sable.

2. Description de l'ensemble géologique du terrain

Les sondages réalisés au niveau du terrain de la présente étude ont permis de remarquer une conformité des formations entre eux, et cette dernière a mis en évidence ce qui suit :

- Une couche de remblai argileux avec débris de construction.
- Une couche de couleur beige sous jacente à la couche de remblai faite de la marne sableuse, pâteuse à mi- raide et concrétionnaire par endroit, s'étale jusqu'à l'envers la 6.00 mètres de profondeur, cette couche intercalée par une argile marron foncé.
- Couche de couleur grisâtre sous-jacente à la couche de la marne beige, faite d'une marne.

3. Contexte géologique de la zone où se trouve le terrain

Sur le plan géologique, le site fait partie de Tlemcen, est constitué par une formation de marne grisâtre surmonté par une couche de marne calcaire. Ces formations confirmant l'indication de la carte géologique de la région de Tlemcen que ce site revient à l'époque du miocène de la période néogène de l'ère cénozoïque.



Figure 3.4 : Situation de la zone d'étude sol N°3.

Le quatrième échantillon

Il s'agit d'est une agile prélever d'une manière quelconque de la région du Beni Ouarsous qui se situe dans le nord de Tlemcen en Algérie.



Photo 3.5 : Site de prélèvement de sol 4.

3.3. Identification des sols testés

Les paramètres des sols sont indiqués sur la figure 3.5 et le tableau ci-dessous ces résultats sont obtenus à partir des essais physico-chimie dans le but de faire une identification minéralogique des sols étudiés.

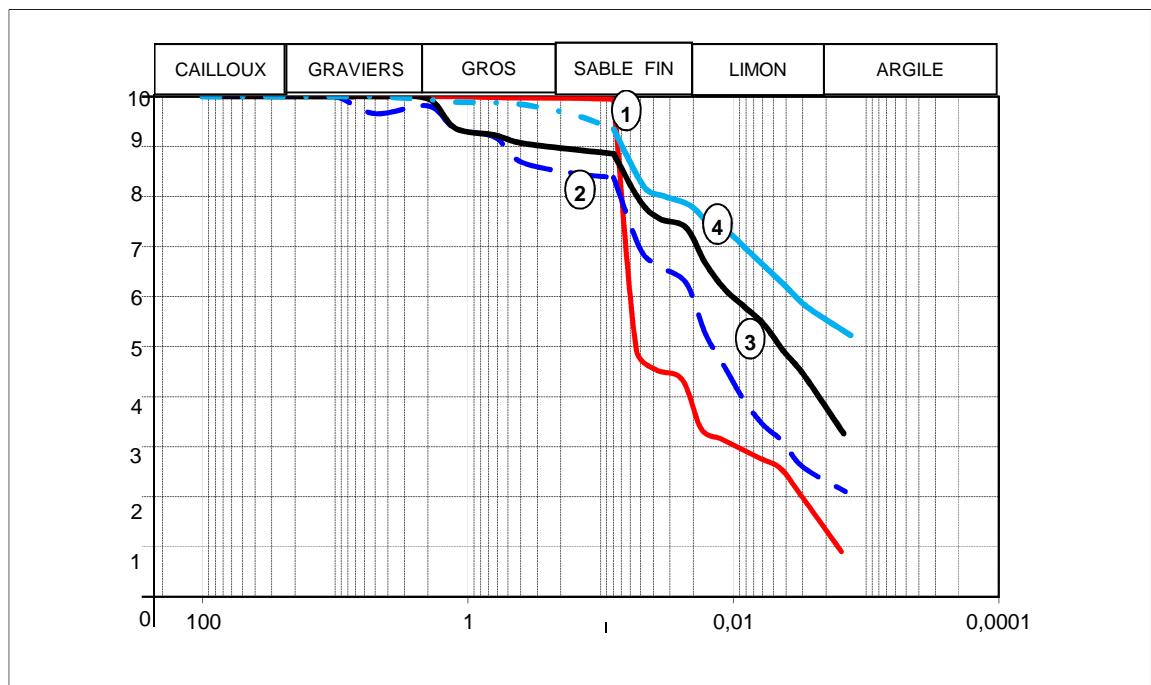


Figure 3.5 : Courbes granulométrique des sols testés.

Tableau 3.1 : Paramètres enregistrés des sols étudiés.

	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol4
% Argiles	12	6	23	67
% Limon	22	35	30	23
% Sable	66	59	47	10
W ₁ (%)	37	42	46	59
Ip (%)	17	18	23	27,72
W _{OPN} (%)	17,3	18,1	16,9	18,9
CaCO ₃ (%)	16	16	12	4
Valeur du Bleu %	4	4	4	14

Le premier échantillon sa granulométrie montre qu'il s'agit d'une marne sableuse, limono-argileuse et faiblement graveleuse. Ayant une plasticité moyenne à élevée d'après la mesure de la limite de liquidité et l'indice de plasticité W₁ et Ip respectivement 34 % \leq W₁ \leq 43% et 11% \leq Ip \leq 23%. Valeur de bleu à 3% \leq VBS \leq 4% il montre que le sol est sensible à l'eau et a partir du pourcentage du CaCO₃ on a pu conclure qu'il s'agit d'une marne sableuse.

Le deuxième échantillon sa granulométrie montre qu'il s'agit d'une marne grisâtre,. avec une plasticité moyenne à élevée d'après la limite de liquidité et l'indice de plasticité W₁ et Ip respectivement 40 \leq W₁ \leq 47 % et 15 \leq Ip \leq 25%. Valeur de bleu à 2 \leq VBS \leq 5 il montre que le sol est sensible à l'eau et a partir du % du CaCO₃ on conclure que l'échantillon s'agit d'une marne grisâtre.

Le troisième échantillon sa granulométrie montre qu'il s'agit d'un limon sableux à argileux avec une plasticité élevée.

12% \leq CaCO₃ \leq 15 % => confirmant que c'est une marne sableuse.

Le quatrième échantillon leur granulométrie montre qu'il s'agit d'une argile. A une plasticité élevée d'après leurs limite de liquidité et l'indice de plasticité W₁ et Ip respectivement 48% \leq W₁ \leq 60 % et 17% \leq Ip \leq 29 %. Valeur de bleu compris entre 3% \leq VBS \leq 4% ce qui indique le degré de sensibilité à l'eau et a partir du 4 % du CaCO₃ nous avons pu déduire qu'il s'agit d'une argile.

3.3.1 L'essai Proctor

Le principe consiste de compacter avec une énergie définie un échantillon de sol remanié dans un moule normalisé et à mesurer le poids volumique sec obtenu. L'essai est pour différentes teneurs en eau différentes. Pour but d'étudier l'influence de la teneur en eau d'un échantillon de sol sur le poids volumique sec de cet échantillon soumis sous une énergie de compactage bien déterminée fixe.

Les résultats se présentent sous la forme d'une courbe la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau. Cette courbe à un maximum dit "Optimum Proctor".

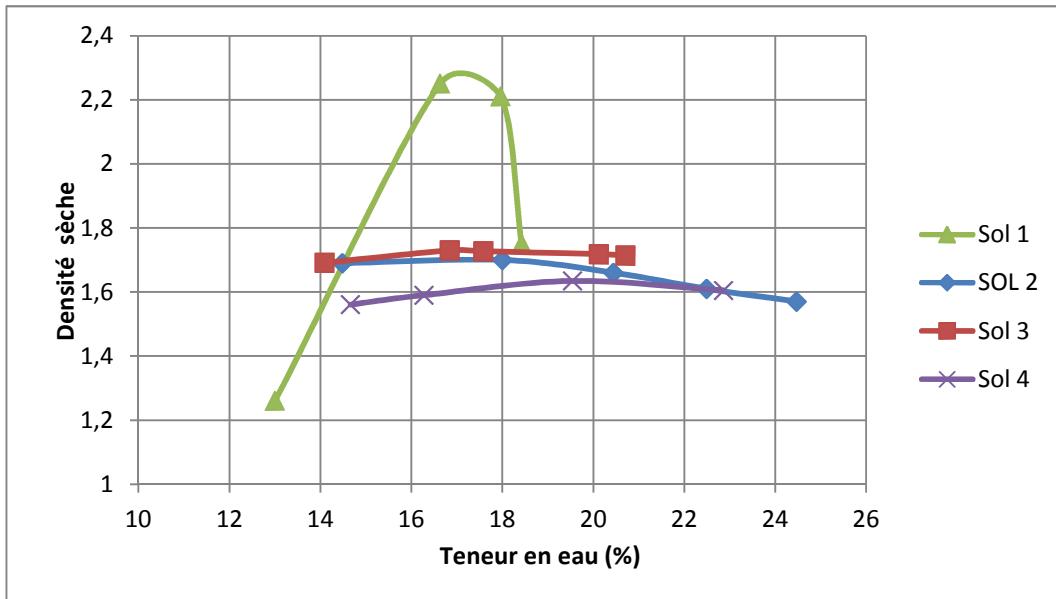


Figure 3.6: Courbes Proctor des quatre sols.

3.4 Caractérisation de dispersion

3.4.1 Essais de la sédimentation en parallèle

L'essai consiste à établir la granulométrie de l'argile selon la procédure ASTM D4221 – 99 de deux manières (Tarog 2000).

- ❖ La première est effectuée en utilisant un essai standard, dans lequel l'échantillon d'argile est dispersé à l'aide d'un agent chimique.
- ❖ La deuxième est effectuée sans l'ajout d'un agent dispersant et sans agitation mécanique.

La différence marquée entre les deux granulométries enregistrées, montre la tendance à la dispersion naturelle de l'argile testée.

L'essai de sédimentation en parallèle conduit à établir le taux de dispersion D défini par le rapport entre les pourcentages de fines inférieures à 5 microns dans les deux cas spécifiques d'essai. Il est défini par :

$$D = \frac{\% \text{ fines} < 5\mu\text{m}(\text{sans dispersant})}{\% \text{ fines} < 5\mu\text{m}(\text{avec dispersant})} \times 100$$

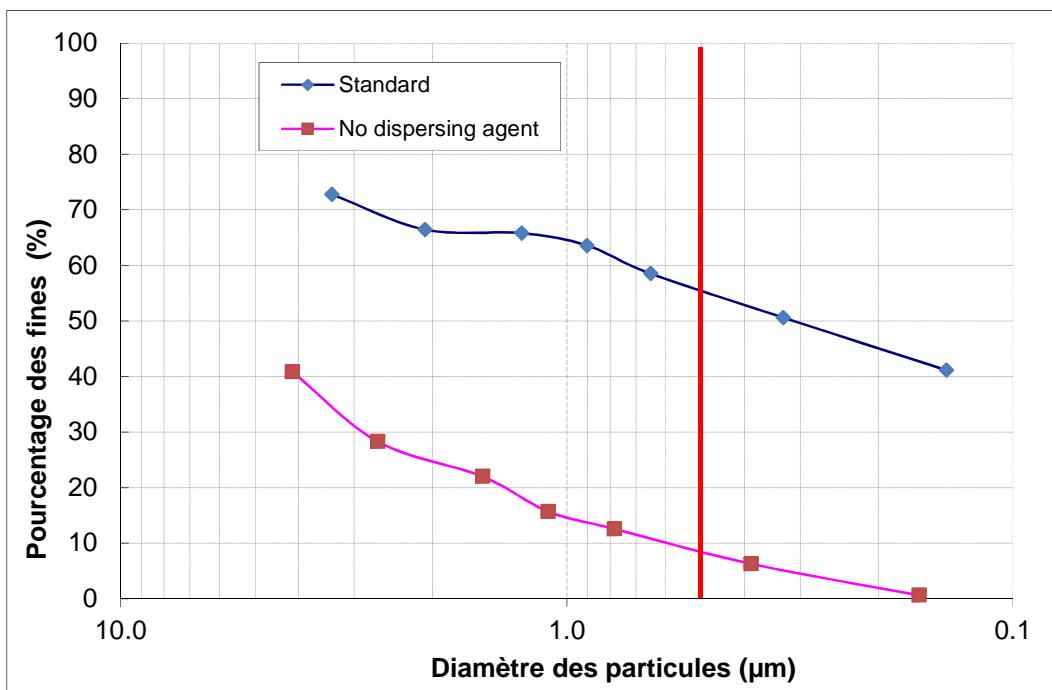


Figure 3.7 : Essai de sédimentométrie en parallèle selon la norme ASTM D4221 – 99.

Après cette analyse les résultats sont résumés au tableau ci-dessus

Tableau 3. 2 : Résultats du sédimentométrie.

Echantillon	Nature de sol	% passant 5µm		%D	Niveau de dispersion
		Avec défloculant	Sans défloculant		
1	Marne sableuse	54,84	8,08	14,74	Non dispersif(ND)
2	Marne	43,21	3,99	9,23	Non dispersif(ND)
3	Marne sableuse	72,24	3,95	5,46	Non dispersif(ND)
4	Argile	68.23	45,52	66,72	Très dispersif

3.4.2 Crumb test

Cet essai est considéré comme la plus simple méthode pour l'identification des sols dispersifs, Il est basé uniquement sur des observations qualitatives directes.

L'essai consiste à préparer des échantillons cubiques de sol (d'environ 15 mm de coté), puis immerger dans l'eau distillée (250 ml). L'échantillon doit être posé sur le fond d'un verre cylindrique, à côté du bord. La tendance des particules de sol à se disperser dans une suspension colloïdale se fait par observation du nuage formé au bout de 2 minutes, 1 heure et 6 heures. Selon le degré de turbidité du nuage, le sol est classé dans un des quatre niveaux de dispersion (ASTM D6572 - 00).

Tableau 3.3 : Résultats de l'essai d'émiéttage .

	Type des sols			
	Sol1	Sol2	Sol3	Sol4
Niveau de dispersion	1	1	1	4
				

Photo 3.6 : Résultats d'essai d'émiéttage.

3.4.3 Pinhole test

L'essai consiste à faire circuler de l'eau distillée dans un petit trou de 1mm de diamètre préformé dans l'échantillon. La durée globale de l'essai est de 25min. la classification du sol en terme de dispersait se base sur le débit de l'écoulement, la couleur de l'eau à la sortie de l'échantillon et le diamètre final du trou. Les différentes classes de dispersion sont : ND1 non dispersif, ND2 non dispersif, ND3 légèrement dispersif, ND4 modérément dispersif, D2 dispersif et D1 très dispersif (ASTM D4647 – 06).

Tableau 3.4 : Résultats de Pinhole test.

	Charge(cm)	Temps(s)	Débit(cm/s)	Couleur de l'eau	Diamètre moyen du trou final	Niveau de dispersion
sol 1	5	5	0,267	légèrement clair	1,68	ND3
	5	10	0,176	légèrement clair		
	18	5	0,795	légèrement clair		
	38	5		légèrement clair		
	102	5	0,997	légèrement clair		
sol 2	5	5	0,754	légèrement clair	1,7	ND3
	5	10	0,668	légèrement clair		
	18	5	1,097	Légèrement clair		
	38	5	2,9	légèrement clair		
sol 3	5	5	0,165	légèrement clair	1,65	ND3
	5	10	0,039	légèrement clair		
	18	5	0,173	légèrement clair		
	38	5	0,938	légèrement clair		
Sol4	5	5	1,3	Très sombre	1,6	D2
	5	10	1,35	Très sombre		
	18	5				

3.5 Conclusion

Dans cette partie de notre projet de fin d'études on a fait une analyse sur quatre échantillons d'identification générale ainsi une partie de caractérisation de dispersion par les trois essais classiques actuellement employées à savoir la sédimentométrie en parallèle, l'essai d'émiéttage et l'essai de l'aiguille, nous avons pu conclure en cohérence entre les trois tests pour l'ensemble des sols étudiés sur le caractère dispersif de ces derniers.

L'essai d'émiéttage basé sur l'observation à l'œil, pour le pinhole test, dépend de la nature de sol ainsi que la teneur en eau initiale du sol car cette dernière fait une différence dans le cas où on a le sol plus humide, l'écoulement se fait à une vitesse moins que l'autre qui est sèche tous ça sous une charge hydraulique constante.

4 CHAPITRE IV – STABILISATION PAR L'AJOUT DU CIMENT D'UN SOL DISPERSIF

4.1 Introduction

Ce chapitre consiste à la stabilisation de sol le plus dispersif parmi ceux étudiés dans le chapitre précédent. On a opté dans cette contribution de faire la stabilisation de ce sol par le ciment, il s'agit de notre contribution proprement dite puisque à notre connaissance ce sujet est très peu étudié dans la littérature internationale.

L'utilisation des ciments permet d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques par liaison des grains de sol, le traitement au ciment est le plus souvent employé pour la réalisation des couches de forme performantes.(Note d'information, 1990).

La solidification d'un sol dépend fortement de son compactage, complémentaire au traitement aux liants hydrauliques. Les paramètres de compactage, énergie et teneur en eau, influencent la porosité et la perméabilité du sol traité. Une porosité faible favorise le gain de performances mécaniques à court terme, les hydrates cimentaires assurant rapidement la liaison entre les grains du sol, tandis qu'une perméabilité faible permet d'assurer la durabilité du matériau traité à long terme. (Saussaye, 2012).

4.2 Étude bibliographique sur la stabilisation des sols dispersifs

Plusieurs recherches en été effectués par les traitements chimiques pour la stabilisation des sols dispersifs et l'amélioration de leurs caractéristiques; parmi les additifs utilisé on constate la chaux, le lait de chaux et les cendres volantes. Dans la suite un détail ce le traitement sera exposé de point de vue bibliographique. Cette étude vise d'acquérir les connaissances théoriques dans ce domaine.

4.2.1 Chaux

La plus part des sols dispersifs peuvent être rendus non dispersifs par l'ajout d'une petite quantité de la chaux $[Ca(OH)_2$ ou CaO] ou de gypse $[CaSO_4$ ou $CaSO_4 \cdot 2H_2O$]. La quantité de la chaux peut être déterminée par des essais au laboratoire. Sherard a utilisé l'essai de trou d'épingle pour déterminer ces quantités. Il a proposé d'ajouter une proportion de 2 % à 3% de la chaux pour diminuer la dispersion des argiles (Fell et al, 1992).

Bhuvaneshwari et al (2007), étudient la stabilisation et la modification microstructural des sols argileux dispersifs par l'ajout de la chaux. L'effet été étudié par l'essai de gonflement libre, l'essai de trou d'épingle, le double hydromètre, l'essai de miette et les essais chimiques :

Le sol est très dispersif avec un indice de dispersion de 71, l'ajout d'une petite quantité de chaux ne suffit pas de réduire la dispersion, alors que l'ajout de 5% de chaux diminue l'indice de dispersion a 9.5.

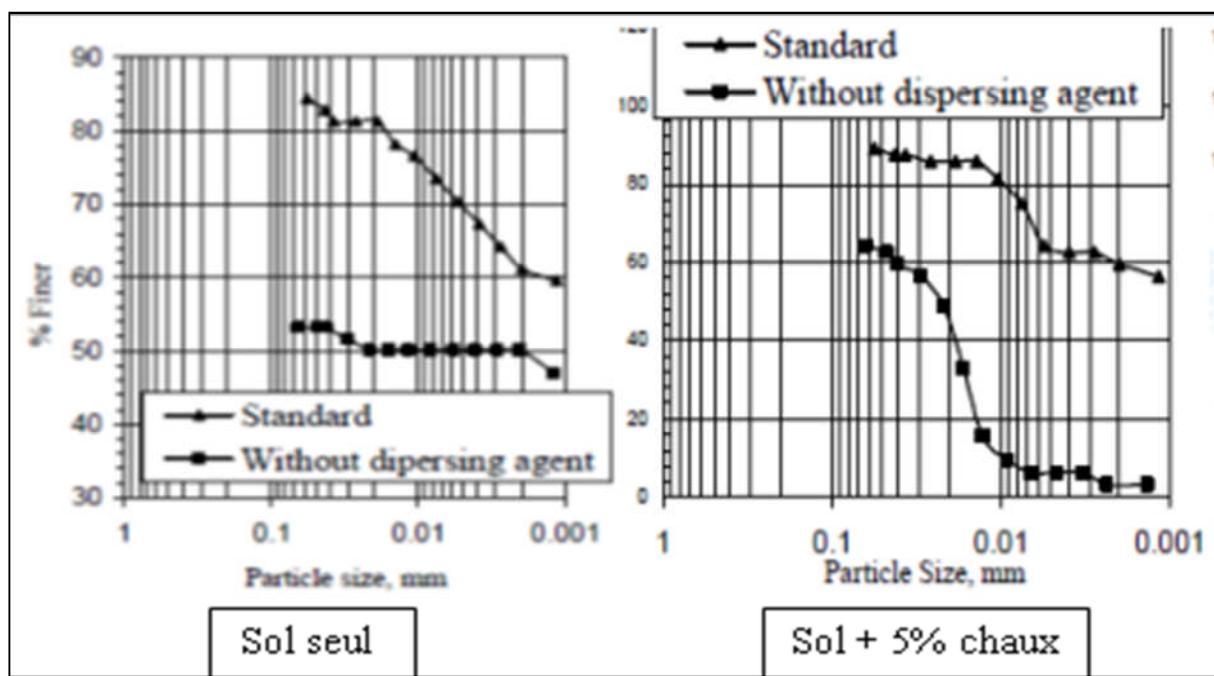


Figure 4.1 : Résultats de l'essai de double hydromètre (Bhuvaneshwari et al (2007).

4.2.2 Lait de chaux

Belarbi et al., (2012), ont utilisés le lait de chaux pour l'amélioration des caractéristiques des sols dispersifs, ils ont trouvés que l'additif a un effet remarquable sur les propriétés physiques, mécaniques et dispersives de sol. les résultats montrent que le pourcentage de 6% est considéré comme le sommet l'influence de lait de chaux sur le caractère dispersif de sol, tel que le sol se transforme d'une class D4 à une classe D1 selon la procédure de l'essai d'émiéttage (figure 4.2), ainsi l'indice de dispersion est diminué de 67% vers 10 % selon la procédure de sédimentation en parallèle dont la teneur de 6 % en lait de chaux (figure 4.3).

Echantillon	Après 2 min	Après 1 heure	Après 6 heures	Classe de dispersion
Sol naturel				D4
Sol traité à 6% de lait de chaux				D1

Figure 4.2 : Résultats de l'essai d'emiéttage (Belarbi et al., 2012).

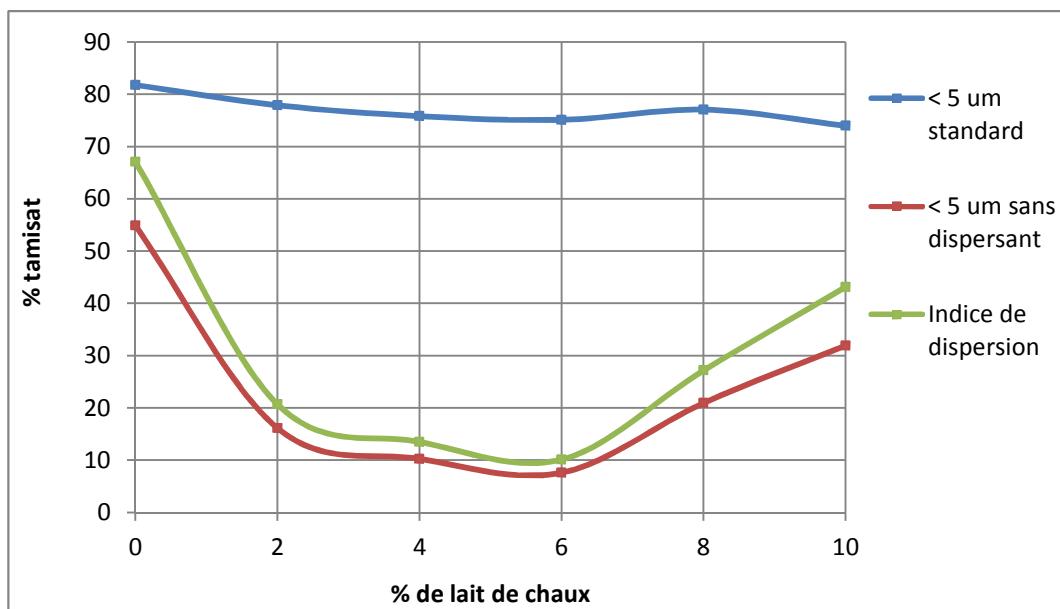


Figure 4.3 : Résultats de l'essai de sédimentation en parallèle (Belarbi et al., 2012).

4.2.3 Cendres volantes

L'utilisation des cendres volantes comme matériaux de stabilisation pour le sol semble d'être une solution intéressante. Cette utilisation aurait des avantages, en plus de la stabilisation, environnementaux.

Indraratna. R, (1996), a étudié l'effet des cendres volantes sur les sols colluviaux. Une série d'essais de consolidation drainés triaxiaux ont été réalisés sur des échantillons compactés à leurs teneurs en eau optimales, avec l'objectif d'étudier l'effet de l'additif sur la résistance au cisaillement caractéristiques de la colluvion traité. La variation des indices des vides avec la pression appliquée est montrée dans la figure 4.4.

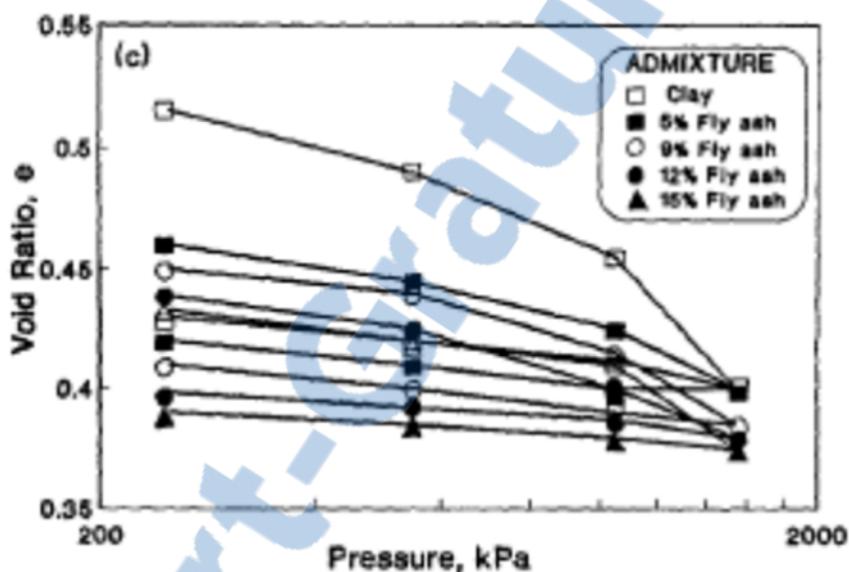


Figure 4.4 : Comportement de consolidation des échantillons traités aux cendres volantes.
(Indraratna. R., 1996).

Bhuvaneshwari et al., 2007 ont trouvé que l'addition des cendres volent seulement n'a aucun influence sur le pourcentage de la dispersion, alors que l'ajout de la 2% de la chaux avec 15 % des cendres a donné une diminution remarquable de taux de dispersion avec la plus part des essais (figure 4.5). Les cendres volent n'a aucun individu de cimentation, ces propriétés dues à l'absence du calcium, d'où le processus de la flocculation et l'agrégation n'a pas été développée. Mais avec l'addition des activateurs comme la chaux, la caractéristique de cimentant été données au cendres volant, l'action combinée de l'agrégation et de l'attache mécanique réduit la dispersion.

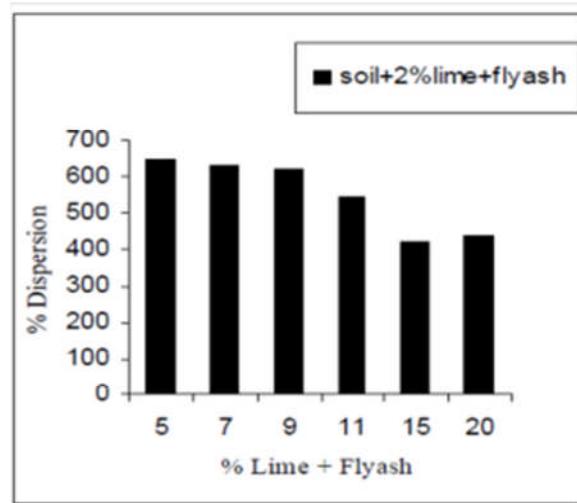


Figure 4.5 : Résultats de l'essai de gonflement libre d'un sol traité à des mélanges de 2% de la chaux plus différent pourcentages de cendres volantes.(Bhuvaneshwari et al., 2007).

4.3 Propriété de l'additif ciment

Le ciment utilisé est de type CPJ CEM II 42.5 (85 % de Clinker ; 3 % de Gypse ; 10 % de Pouzzolane et 2 % de Calcaire sableux). Il provient de la cimenterie de Béni-Saf (AïnTémouchent). Ses propriétés chimiques sont résumées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Caractéristiques chimiques du ciment.

Eléments	Analyse chimique	Fluorescence X (%)
SiO ₂ (%)	27,97	25,64
Al ₂ O ₃ (%)	5,43	5,64
Fe ₂ O ₃ (%)	3,05	3,06
CaO (%)	56,37	58,01
MgO (%)	0,71	0,72
SO ₃ (%)	-	1,73
Na ₂ O (%)	0,30	0,71
K ₂ O (%)	0,43	0,51
CaO libre (%)	0,75	-
Résidus insolubles R.I.	9,11	-
Perte au feu	3,11	-

4.4 Mécanisme de stabilisation par l'ajout de ciment

Le ciment portland comporte des silicates, aluminium et sulfates de calcium. Lors de l'hydratation, le ciment forme de la chaleur éteinte appelée portlandite. Les réactions entre le sol, le ciment et l'eau commencent par un échange de cations puis la production d'agents de cimentation.

L'action de stabilisation par les ciments est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température (Johnson, 1960). Les

quatre mécanismes contribuant à la stabilisation au ciment des matériaux de sol argileux sont résumés dans le tableau (Azzouz, 2006):

Tableau 4.2 : Mécanisme de stabilisation des sols par le ciment (Azzouz, 2006).

Mécanisme de stabilisation au ciment	Description
Hydratation par ciment	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Les fortes interactions se développent entre les particules du sol. ✓ Le plus haut squelette continue des formes matérielles dures et fortes et en ferme une matrice de sol inchangé, renforçant le matériel traité et on remplir les vides. ✓ La perméabilité et le gonflement/retrait a tendance a réduites. ✓ la résistance aux chargements due a l'augmentation de la teneur en eau.
Echange cationique	L'échange cationique change la charge électrique, réduisant la plasticité et ayant pour résultats la floculation et agrégation des particules du sol.
carbonations	La chaux produite pendant l'hydratation du ciment réagit avec l'anhydride carbonique en air aux agents cimentaire de forme.
Réactions pouzzolanique	La chaux libre libérés pendant l'hydratation et de la silice ou l'alumine des particules d'argile réagissent en présence de l'humidité aux agents de cimentaire de forme.

Quand le ciment est mélangé avec le sol, généralement, il y aura réduction de la limite de liquidité, la limite de plasticité et le potentiel de changement de volume des sols. Mais il y aura une augmentation de la limite de retrait et de la résistance au cisaillement. L'augmentation de la résistance de sol traité au ciment est faite par des réactions de cimentation primaires et secondaires de ciment dans la matrice sol-ciment. La cimentation primaire est due aux produits d'hydratation du ciment Portland. Une variation de composants et les gels sont formés par les réactions d'hydratation.

L'hydratation du ciment se produit et les produits d'hydratation principaux sont formés lorsque l'eau interstitielle du sol entre en contact avec du ciment. Les produits sont des silicates de calcium hydratés, aluminates de calcium hydraté et de la chaux hydratée. Les deux premiers produits hydratés sont les produits principaux et la chaux hydratée est déposé en tant que phase séparée. Une matrice de squelette solide est formée lorsque ces particules de ciment lient les grains de ciment adjacents entre eux et entourent les particules non modifiées. Les phases de silicate et d'aluminate sont mélangés à l'intérieur et peut pas complètement

cristallin. Les produits d'hydratation induire la cimentation entre les particules du sol lorsque la teneur en ciment est suffisamment élevée. Une partie de l'hydroxyde de calcium peut aussi être mélangé avec d'autres phases hydratées. En plus de processus de la réaction primaire, il y a également une phase secondaire entre l'hydroxyde de calcium libérés et l'alumine et la silice de l'argile qui conduit à la formation de silicate de calcium hydratés supplémentaires et d'aluminate de calcium hydratés

4.5 Résultats et discussion

4.5.1 Influence du ciment sur les limites d'Atterberg

La figure 4.6 représente la variation des limites d'Atterberg de sol qui a contribué a des différents dosages du ciment.

L'augmentation de pourcentage de l'additif donne des résultats remarquables sur la progression de la limite de liquidité de 59.07 à 70.8%. Cet effet est un conséquent du l'ajout du ciment évidement car chaque dosage nécessite une quantité d'eau en plus pour fait l'hydratation. Cette action est pour les quatre premiers dosages de 2% à 8%, a partir de 10% on remarque que l'effet inverse se constater et la limite de liquidité va diminuer.

Ce résultat est assimilé avec les résultats du Yon, 2007 Cité par Ghemebaza. Même résultats pour le traitement par la le lait de chaux effectué par Belarbi et al., en 2012. Ainsi pour Delavernhe Lette en 2011 qui a utilisé la chaux et les sels (NaCl).

Par contre, d'autre chercheurs comme sont trouvées que la limites de liquidité diminue avec l'augmentation du dosage du ciment sont expliqué par l'échange cationique dans le mélange sol-ciment.

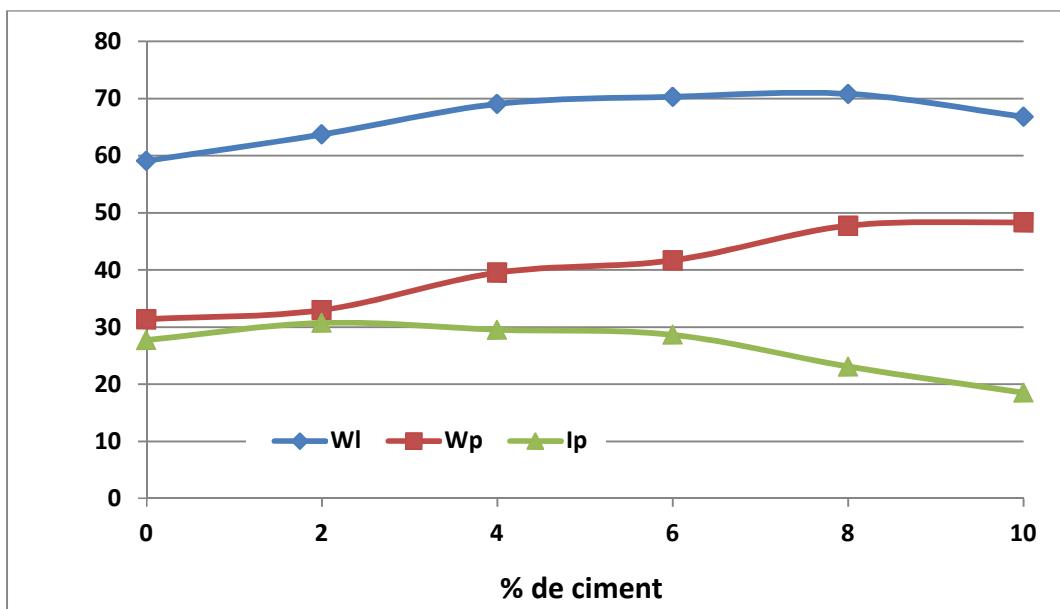


Figure 4.6 : Influence de ciment sur les limites d'Atterberg.

On constat pour la limites de la plasticité que l'augmentation par rapport le croissement de la teneur en ciment de 2% à 10% de valeur du 31,5% à 48,31%, ces résultats sont bien en cohérence avec ceux de Ghemebaza sur un sable limoneux de la région de Sidi Bel Abbes traité par le ciment.

Cette augmentation peut être justifié par le rôle du notre liant ayant un effet clair avec des pas de 2%, Il s'agit d'un réarrangement des grains du sol ce qui donne une nouvelle structure plus dense que la précédente, ceci implique a donner des quantités plus de l'eau.

4.5.2 Influence de ciment sur l'optimum Proctor

Les résultats se présentent sous la forme d'une courbe la densité sèche en fonction de teneur en eau. Cette courbe à un maximum dit "Optimum Proctor".

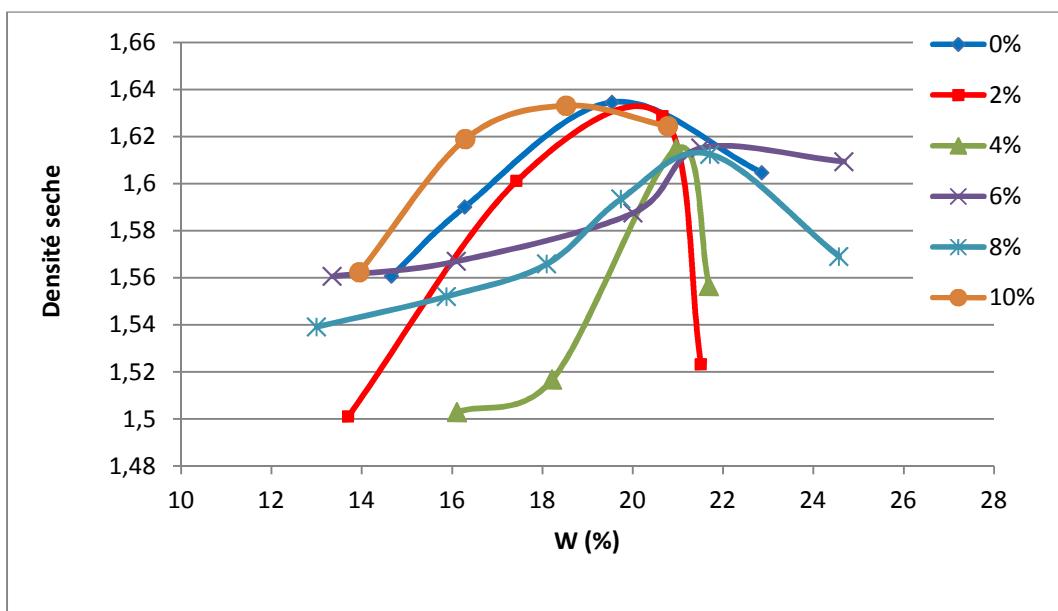


Figure 4.7 : Courbes Proctor de sol Beni Ouarsous à différents dosage de ciment.

Après traitement et compactage à l'optimum Proctor Normal (OPN) d'un sol fin, la taille et le nombre des pores micrométriques diminuent, le volume poreux total est réduit, les agrégats d'argiles sont plus petits, plus nombreux, plus arrondis, formant un assemblage plus compact et plus résistant selon Chabane 2004 et Le Runigo 2008.

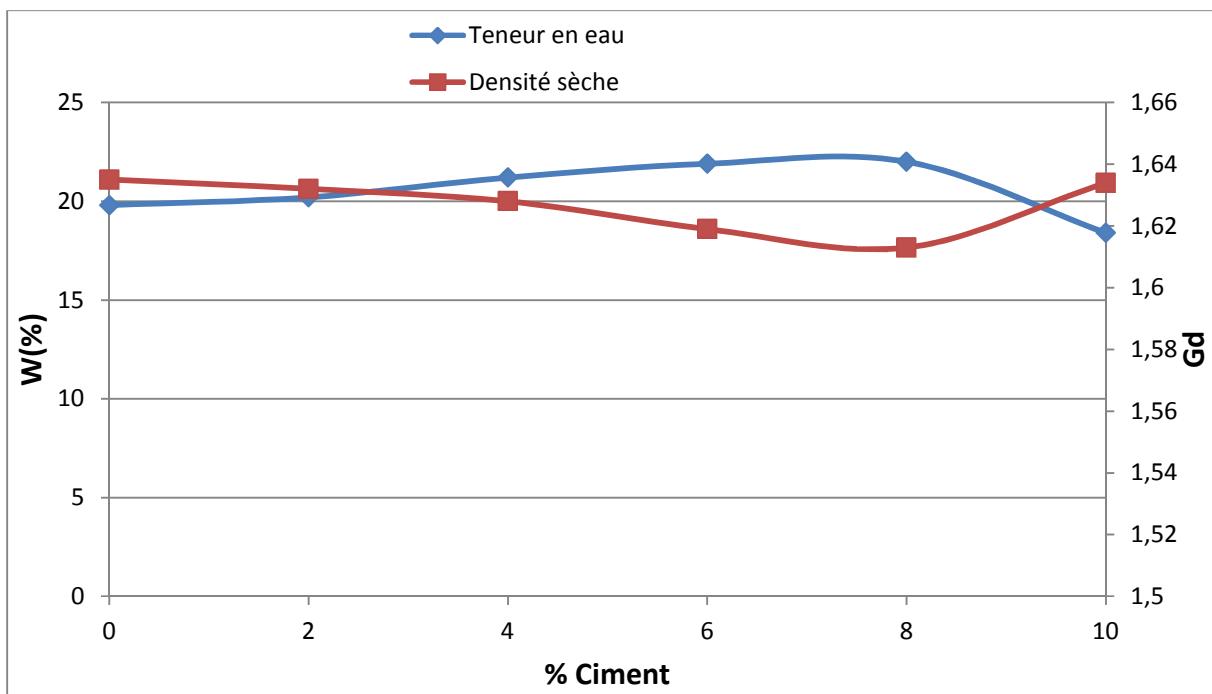


Figure 4.8 : Influence du ciment sur l'optimum Proctor

Lorsque on dit ciment c'est une augmentation du l'eau pour le mécanisme d'hydratation. Le phénomène qui se passe avec les courbes Proctor suit à l'ajout lorsque ce produit augmente jusqu'à atteindre la valeur maximale de 22% pour 8% du ciment à partir de ce point lors de l'ajout de ciment le phénomène inverse se produit.

Lorsqu'on dit l'optimum Proctor on doit discuter sur deux paramètres la teneur en eau et la densité sèche cette dernière va diminuer en fonction de l'augmentation de dosage de ciment.

Cette tendance inverse c'est à cause de vide inter feuillet entre les particules de l'argile qui est sèche mais une fois on va introduire notre additif on va remarquer à partir de résultats obtenus un abaissement dans ce paramètre car on sait que le ciment c'est un produit absorbant de l'eau d'une part, même il va coller les grains et donner une réduction d'espace inter feuillet par la quantité du ciment et par conséquent il améliore la résistance par rapport le pourcentage précédent d'autre part. Ce résultat n'est plus valable à partir de 8% de dosage.

4.5.3 Influence du ciment sur L'essai d'émiéttage

Les résultats de l'influence ciment sur l'essai d'émiéttage représenté dans le tableau ci-dessus. Cet essai est qualitatif basé sur l'observation à l'œil. L'effet de l'additif est remarquable car le sol avant traitement est classé dans le niveau 1 de dispersion D4 l'ajout de ciment va diminuer ce taux de dispersion à un niveau de dispersion D2 pour un pourcentage de 2% les autres dosages de 4 % à 8% donne une classe de D1 où le dernier teneur de ciment permet de perdre la résistance améliorer par dosages précédentes.

Tableau 4.3 : Résultats d'influence de ciment sur l'essai d'émiéttage

	2 min	1h	6h	Niveau de dispersion
0%				D4
2%				D2
4%				D1
6%				D1
8%				D1
10%				D2

4.5.4 Influence de ciment sur l'essai de sédimentation en parallèle

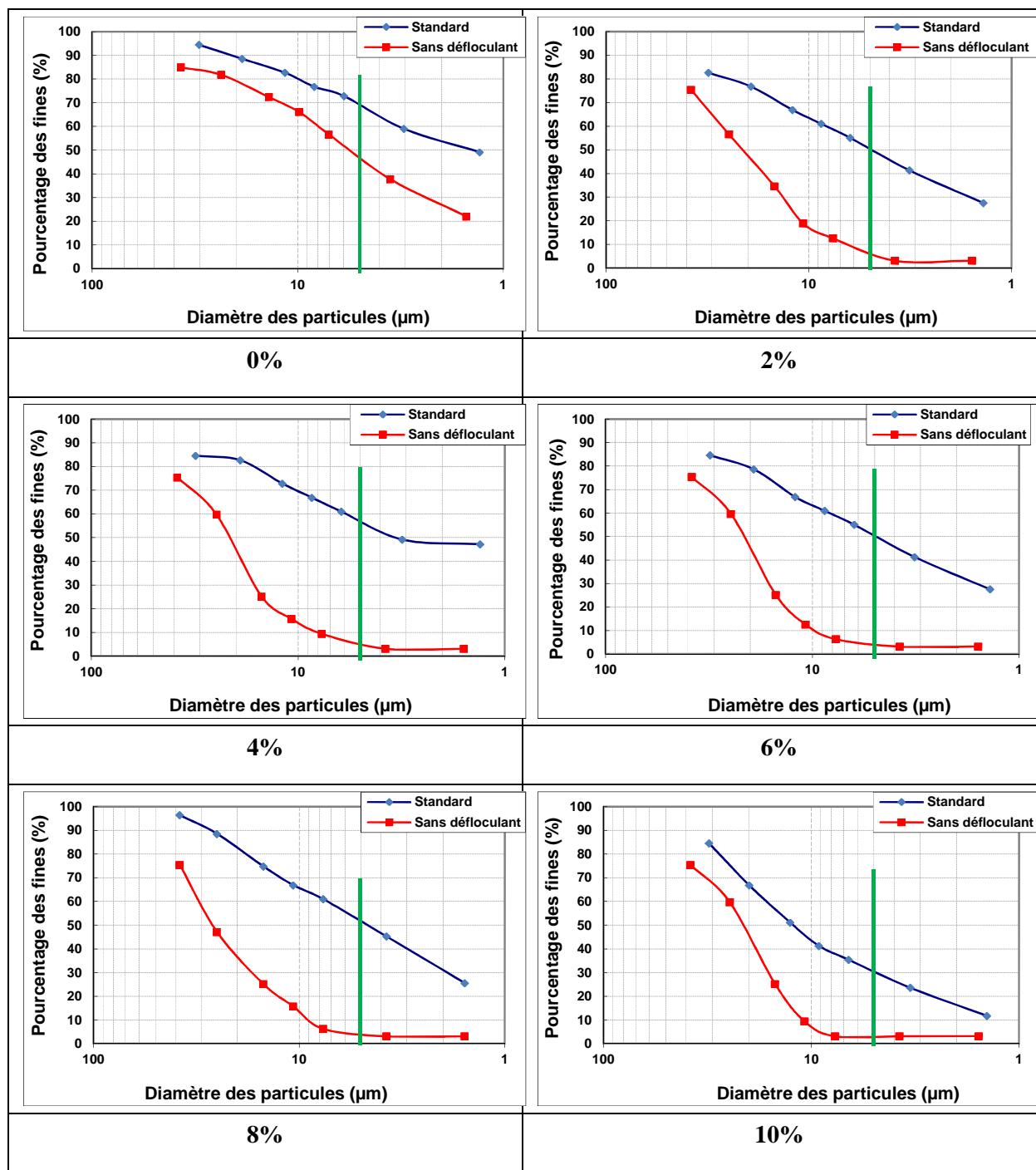


Figure 4.9 : Courbes granulométrique des différents sols selon la procédure ASTM D4221-99

Tableau 4.4 : Classification de sol traité à différent dosage en ciment.

Dosage de ciment (%)	< 5 µm avec dispersant (%)	< 5 µm sans dispersant (%)	Indice de dispersion (%)	Classe de dispersion	
				Selon ASTM	Knodel (1991)
0 %	68,23	45,52	66,72	Dispersif	Dispersif
2%	49,43	6,19	12,53	Non dispersif	Non dispersif
4%	56,38	5,11	9,06	Non dispersif	Non dispersif
6%	49,29	4,11	8,35	Non dispersif	Non dispersif
8%	54,94	4,14	7,54	Non dispersif	Non dispersif
10%	29,61	3,14	10,61	Non dispersif	Non dispersif

L'ajout du ciment à dosage différents permet d'améliorer la résistance et les caractéristiques mécaniques et de dispersion. Le premier dosage fait un grand changement dans le milieu où on remarque que l'indice de dispersion diminue rapidement de 66,72 et de classe D4 très dispersif selon la norme ASTM et Knodel 1991 à 12,53% et non dispersif D1 respectivement, c'est-à-dire une petite quantité de ciment influence positivement sur ce sol et on a atteint l'objectif d'amélioration des propriétés mécaniques d'autant plus sur les caractéristiques de dispersion.

Après cette valeur de teneur en ciment il est presque clair visuellement une stabilisation de l'effet jusqu'à atteindre la valeur de 10% ou l'effet inverse est enregistré expérimentalement.

Cette variation est concordance avec celle de Belarbi et al., 2012 qui ont travaillé sur la chaux la différence c'est que la chaux le phénomène inverse est enregistré à partir de 6% et perdre la résistance de sol rapidement par contre on a cette variation par le ciment à partir de 8% et le retour à l'état initial du sol se fait moins que le traitement par la chaux.

On peut conclure que cette différence revient à la composition chimique de chaque liant hydraulique et leur réaction au sein du sol.

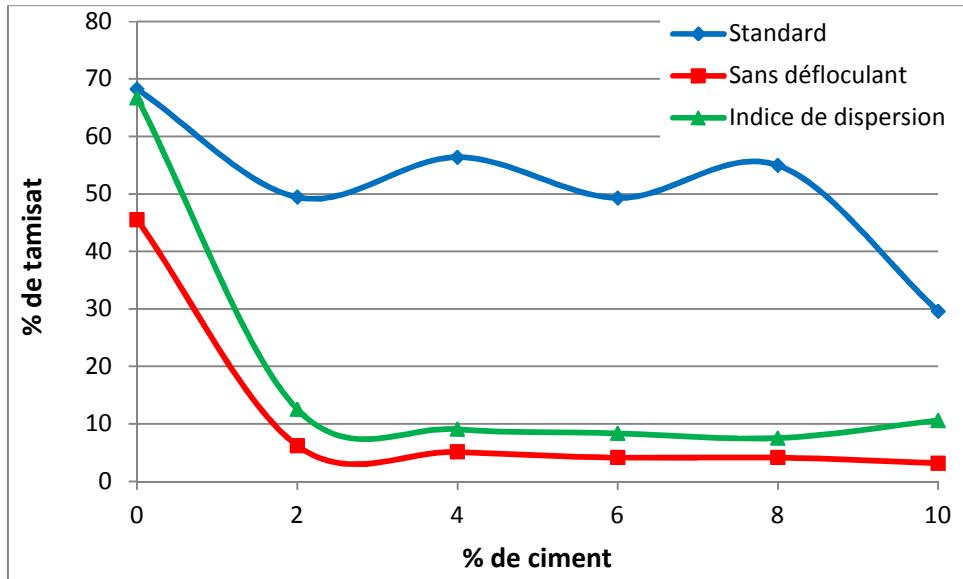


Figure 4.10 : Résultats de l'essai de sédimentation en parallèle.

4.6 Conclusion

L'étude de stabilité de quatrième échantillon vient après un résultat négatif de la caractérisation de dispersion qui montre que le sol est très dispersif. Dans ce cas nous nous introduirons un liant hydraulique à différents pourcentage, ce qui nous a permis de faire l'étude expérimentale sur un sol dispersif.

L'introduction des ciments implique une amélioration des propriétés mécaniques telles que la densité sèche optimale, la teneur optimale, les limites d'Atterberg d'une part, diminution de caractère de dispersion d'autre part.

Une remarque générale qu'il s'agit d'une évolution croissante jusqu'à atteindre une valeur maximale pour l'ensemble des propriétés étudiées, pour les différents pourcentages de ciment.

L'augmentation de pourcentage de ciment implique d'une manière très nette dès le premier dosage une diminution de l'indice de dispersion de 66,72 % à 12,53% après une diminution est enregistré pour les trois dosages par la suite 4%, 6% et 8% des petites variations sont observées, le sol revient à l'état initial pour 10% du ciment et l'indice de dispersion augmente.

Conclusion générale

Les processus érosifs constituent la cause majeure des ruptures des ouvrages hydrauliques comme les digues ou les barrages en terre. Ils touchent également de nombreux ouvrages comme les remblais d'infrastructure de transport ou les fondations de piles de ponts. Les phénomènes d'érosion sont des processus complexes qui dépendent de multiples paramètres. Il est donc indispensable de les caractériser au travers d'essais dédiés.

L'étude bibliographique que nous avons menée sur les pathologies des ouvrages hydrauliques, et les mécanismes qui conduisent à l'érosion et la dispersion du sol, nous a fourni des pistes pour une meilleure compréhension des caractéristiques du phénomène d'érosion et de dispersion du sol. La présence des sols dispersifs dans le corps de barrage menace leur stabilité.

Les essais disponibles dans notre laboratoire pour caractériser les sols dispersifs sont: l'essai de sédimentation en parallèle qui donne des résultats quantitatifs, l'essai d'émiéttage et l'essai de trou à l'aiguille qui donne des résultats qualitatifs.

Sur les quatre sols utilisés, l'étude a montré que le sol de Beni Ouarsous, est le plus dispersif, des traitements par le ciment sont ensuite faits sur ce dernier dans un but d'améliorer ces caractéristiques et augmenter sa résistance face à l'érosion.

Il a été déduit que pour l'ensemble des études effectuées sur quatre sols, un seul et unique présente une susceptibilité à la dispersion. Ce dernier a fait l'objet d'une étude expérimentale pour diminuer son caractère dispersif. Pour l'ensemble des dosages et pour l'ensemble des paramètres étudiés, il a été déduit que la valeur 8% constitue un seuil de changement de l'effet de ciment, une augmentation, un maximum puis une diminution.

Ce résultat nécessite une étude plus approfondie pour conclure sur l'effet de ciment sur le caractère dispersif des argiles.

Références bibliographiques

- Azzouz F Z.** (2006) « Contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen » Thèse de Magister. Université Abou-bekr Belkaid Tlemcen, Algérie, 267 p.
- Beck Y L.** (2008) « Évaluation de l'état hydrique d'un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques : application géotechnique » Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, France, 322 p.
- Belarbi A., Zadjaoui A. et Bekkouche A.** ;2012 « comportement au laboratoire d'un argile traitée au lait de chaux face à la dispersion » AUGC 2012, Chambéry, France.
- Bendahmane F., 2005 :** L'influence des interactions mécaniques eau- sol sur l'érosion interne. Thèse de doctorat. Université de Nantes.
- Bhuvaneshwari S, Soundra B, Robinson R G and Gandhi S R.** (2007) « Stabilization and Microstructural Modification of Dispersive Clayey Soils » First International Conference on Soil and Rock Engineering, Srilankan Geotechnical Society, Columbo, Srilanka.
- Blais. J,** 2004 : Typologie de l'érosion interne et érosion interne des digues fluviales, courte revue bibliographique.
- Bonilla S., Radzickiab K., Szczesnyb J., Tourmenta R. et Félix H.** 2005 : l'auscultation des barrages en terre : une nécessité.
- 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 Thèse de doctorat, Centre des Matériaux de Grande Diffusion de l'Ecole des Mines d'Alès.
- Cunat P.** (2012) « Détection et évaluation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par analyse de températures réparties, mesurées par fibre optique » Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 205 p
- Das M.,** 2010: Principles of geotechnical engineering, Seventh edition, Printed in the United States of America.p29.
- Degoute G.** (1997) « Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi » Edition Cemagref, France, 183 p.
- Delavernhe L.;** 2011 : Étude multi-échelle de la réactivité des altérites lors du traitement à la chaux, Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- Fell R. MacGregor P., Stapledon D. Bell G., 2005:** *Géotechnical engineering of dams* Taylor & Francis Group plc, London, UK
- Fell.R et Foster.M.,** 2001 : Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- Fell R. Macgregor P. et Stapledon D.,** 1992: Geotechnical engineering of embankment dams. Balkema, Rotterdam.
- Ghemebaza.M.S., Dadouch M. et Bellia Z.,** 2012: Effet du ciment sur le comportement Physico-chimique d'un matériau de la région de Sidi Bel Abbès.

Holtz R. et Kovacs W., traduit par Lafleur J., 1991 : introduction à la géotechnique. Edition de l'école Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.

Hénensal P, Millon Devigne P et Duchatel F. (1987) L'érodimètre LCPC, Rapport interne, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, 21 p

Hénensal P, Millon Devigne P et Duchatel F. (1985) « Première étude de faisabilité d'un érodimètre », Rapport interne, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, 15 p.

Indraratna B. (1996) « Utilization of lime, slag and fly improvement of a colluvial soil in New South Wales, Australia » Geotechnical and Geological Engineering, 14, pp 169-191. **Indraratna B.** (1996) « Utilization of lime, slag and fly improvement of a colluvial soil in New South Wales, Australia » Geotechnical and Geological Engineering, 14, pp 169-191.

Johansson S., 1997: Seepage Monitoring in Embankment Dams, Doctoral Thesis Division of Hydraulic Engineering Sweden

Knodel P. C., 1991: Characteristics of dispersive and problems clay Soils, United States Department of the Interior, Colorado

Lautrin D. (2003) « Vieillissement et réhabilitation des petits barrages en terre » Edition Cemagref, France, 239 p.

Le Runigo B., 2008 :Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques : comportement physico-chimique, microstructural, hydraulique, et mécanique Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes.

Mériaux P., Royet P et Folton C., 2004 : De protection contre les inondations, guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires.

Marche C. (2008) « Barrages, crues de rupture et protection civile » Presses internationales Polytechnique, France, 2eme édition. 26 p.

Poupart M et Royet P. (2001) « La surveillance des barrages » Colloque technique, Aix-en-Provence, Comité français des Grandes Barrage, France, 47 p.

Sanchez R L, Strutynsky A I and Silver M L. (1983) « Evaluation of the erosion potential of embankment core materials using laboratory triaxial erosion test procedure » Technical Report GL-83-4, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, 339p.

SAUSSAYE L. ,2012 : Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification, thèse de doctorat, Université de Caen Basse Normandie, France.

Sjödahl P. (2006) « Resistivity investigation and monitoring for detection of internal erosion and anomalous seepage in embankment dams » Thèse de doctorat, Lund University, Sweden, 96 p.

Schneider S. (2009) « Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols a partir d'une inversion jointe de données d'infiltration et de résistivité électrique » Thèse de doctorat, Unité de Science du sol Thiverval-Grignon, 144 p.

Sherard J L and Decker R S. (1977) « Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects » American society for testing and materials, USA, 495 p.

Tarog. I. ,2000 : TAROG.I, Perméabilité et Erosion interne des mélanges sable – argile, Thèse de doctorat, Ecole doctorale des sciences pour l'ingénieur de Lyon.

Tchoumkam L. A.N., 2010: Détection de fuite dans les barrages en remblai par la méthode de polarisation spontanée et par tomographie électrique : cas de la jonction de deux barrages en remblai. Thèse de doctorat, Université de Montréal école polytechnique de Montréal.

Wan C.F. and Fell R., 2004: Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 373.

Normes

AFNOR NFP 94-051. (Novembre 1995) « Sols : Reconnaissance et essais, Détermination des limites d'Atterberg : Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau » 15 p.

AFNOR XFP 94-041. (Décembre 1995) « Sols : Reconnaissance et essais, Identification granulométrique : Méthode par tamisage par voie humide » 12 p.

AFNOR NFP 94-057. (Mai 1992) « Sol : Reconnaissance et essais, Analyse granulométrique des sols : Méthode par sédimentation » 20 p.

AFNOR NFP 94-068. (Octobre 1998) « Sols : Reconnaissance et essais, Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à tache » 8 p.

AFNOR NFP 94-048. (Octobre 1996) « Sols : Reconnaissance et essais, Détermination de la teneur en carbonate : méthode du calcimètre » 11 p.

AFNOR NFP 94-093. (Octobre 1999) « Sols : Reconnaissance et essais, Détermination des références de compactage d'un matériau, Essai Proctor normal » 20 p.

ASTM D422. (1963) (Reapproved 2002) « Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils » 8 p.

ASTM D4221. (1999), « Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer » 3 p.

ASTM D4647. (2006) « Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test » 11 p.

ASTM D6572. (2006) « Standard Test Method for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soil by the Crumb Test » 4 p.