



HAL
open science

Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide

Tuan Long Pham

► **To cite this version:**

Tuan Long Pham. Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2008. Français. NNT: . tel-00353451

HAL Id: tel-00353451

<https://pastel.hal.science/tel-00353451>

Submitted on 15 Jan 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : D.U. ...
ED : 430



THÈSE

présentée pour l'obtention du grade de
Docteur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées
Spécialité : Géotechnique
par :

Tuan Long PHAM

ÉROSION ET DISPERSION DES SOLS ARGILEUX PAR UN FLUIDE

présentée à Champs-sur-Marne, le 29 septembre 2008
devant le jury composé de :

P. Lesueur	Rapporteur
J.-P. Gourc	Rapporteur
D. Marot	Examineur
D. Pham Van Bang	Examineur
P. Reiffsteck	Examineur
C. Chevalier	Invité
J.-S. Guedon	Directrice de thèse

Remerciements

Je tiens à remercier M. Philippe Reiffsteck, mon conseiller scientifique, qui m'a guidé aux premiers jours de démarrage de cette thèse, qui m'a mené des premiers pas dans le domaine de la recherche et qui a suivi mon travail pendant trois longues années.

J'aimerais remercier mes trois autres conseillers scientifiques : Mme Christelle Léonard, Mme Myriam Duc et M. Christophe Chevalier qui ont suivi régulièrement l'avancement de mon travail et m'ont aidé à le valoriser par l'écriture d'articles.

Je voudrais remercier ma directrice de thèse Mme Sylvine Guedon, initiatrice du comité de suivi de ma thèse. Les réunions d'avancement de thèse ont été organisées et suivies toutes les six semaines par le comité. Grâce à ces 18 réunions d'avancement, ma thèse a mûri progressivement et sûrement et enfin elle a vu le jour de sa finalisation.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté d'examiner mon travail : M. Marot, M. Pham Van Bang, de rapporter, M. Lesueur et M. Gourc et également président.

Mes remerciements vont également aux techniciens, aux stagiaires et aux collègues à la division Mécanique des sols, des Roches et de la Géologie de l'Ingénieur (MSRGI) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

Merci à ma famille qui a toujours été pour moi d'un grand soutien moral (Bo Trong, Me Binh, Em Tuan) et particulièrement à ma femme Thanh Nga qui était toujours à côté de moi pour partager les difficultés et m'a donné des conseils précieux surtout lors de la dernière période de la thèse.

Résumé

Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide

Les ouvrages en terre des infrastructures linéaires de transport peuvent être sollicités par des événements climatiques exceptionnels générant une élévation du niveau des eaux. Le passage d'une crue s'accompagne normalement d'érosions latérales dues au courant affectant en premier lieu les talus des remblais. Nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux conséquences de la mise en charge des remblais voire de la surverse lorsque le niveau des eaux dépasse les remblais, entraînant une rupture progressive causée par un phénomène d'érosion externe ou interne.

Le présent travail étudie la caractérisation des processus du phénomène d'érosion et de dispersion des sols argileux. Premièrement, l'érosion du sol a été étudiée par le dispositif d'Erodimètre à Jets Mobiles (EJM) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Ce type d'essai permet de caractériser de manière simple la sensibilité à l'érosion de différentes textures de sol aussi bien au laboratoire que sur le terrain. Deuxièmement, cette étude a été poursuivie par des essais d'érosion de trou à l'aide d'un dispositif de « Hole Erosion Test » (HET), conçu et développé au LCPC. Pour différentes textures de sol, l'évolution du taux d'érosion en fonction de la contrainte de cisaillement à l'interface sol-fluide est évaluée et l'érosion interne est caractérisée à l'aide d'une loi d'érosion semi-empirique. Cette étude expérimentale a été complétée par des observations de la surface du sol avant et après érosion avec un Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE). Troisièmement, la dispersion du sol a été étudiée par le nouvel essai d'émiettage (« Crumb Test » amélioré). L'amélioration de l'essai normalisé par l'ASTM aux résultats principalement qualitatifs nous a permis d'accéder à des mesures quantitatives. Les mesures du potentiel zêta avec la zétamètre sont des apports complémentaires dans la description de la dispersion. Finalement, la comparaison des différents essais d'érosion et de dispersion a été abordée, les tendances similaires observées nous permettent d'évaluer le phénomène d'érosion de manière globale.

Mots clés :

Erosion, dispersion du sol, contrainte de cisaillement critique, loi d'érosion, érodimètre à jets, essai de trou, essai d'émiettage.

Abstract

Erosion and dispersion of clayed soils by a fluid

The embankment component of linear infrastructure of transport can be submitted to exceptional climatic events generating a rise in water level. The passage of a flood is normally the cause of lateral erosion due to current affecting primarily the slope of embankments. We focus here especially on the consequences of the hydraulic load imposed on the embankment and also the overflow when the water level is beyond the crest, causing a gradual rupture induced by superficial or internal erosion.

This study presents the characterization of the erosion and the dispersion of clayed soils. Firstly, the soil erosion has been studied by the Jet erosion test of LCPC. This type of test is used to characterize the susceptibility to erosion of different soil textures in both the laboratory and the field. Secondly, the study of the erosion phenomenon was conducted with the Hole Erosion Test, designed and developed at LCPC. For a variety of soil textures, the rate of erosion and critical shear stress at the soil-fluid interface is evaluated by using a semi-empirical erosion law. This experimental study was supplemented by observations of the surface before and after erosion with an environmental scanning electron microscopy. Thirdly, the dispersion of soil has been studied by the crumb test. Improving the ASTM standard test in which the results are mainly qualitative allows us access to quantitative measurements. The zeta potential taken with zetameter is a complementary measure in the description of the dispersion. Finally, the comparison of different tests of erosion and dispersion was discussed, similar trends observed allow us to understand the erosion in a global comprehension.

Keywords:

Erosion, dispersion, critical shear stress, erosion law, pinhole test, jets erosion test, hole erosion test, crumb test.

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	I
RESUME.....	III
ABSTRACT	V
SOMMAIRE.....	VII

INTRODUCTION.....	1
--------------------------	----------

ENJEUX ET PROBLEMATIQUE	1
OBJECTIFS ET DEMARCHES	3
PLAN DU MEMOIRE.....	4

CHAPITRE 1 : EROSION ET DISPERSION DU SOL	5
--	----------

1.1	PATHOLOGIES DES OUVRAGES DE RETENUE LIEES A L'EROSION.....	5
1.1.1	Origines du phénomène d'érosion	6
1.1.2	Approche bibliographique.....	7
1.2	TYPOLOGIE DE L'EROSION ET DE LA DISPERSION	9
1.2.1	Typologie de l'érosion externe	9
1.2.1.1	<i>Érosion pluviale</i>	9
1.2.1.2	<i>La houle et les courants</i>	10
1.2.1.3	<i>Marnage</i>	11
1.2.1.4	<i>Jet d'hélice et courant</i>	12
1.2.2	Typologie de l'érosion interne	14
1.2.2.1	<i>Les phénomènes d'arrachement</i>	14
1.2.2.2	<i>Les phénomènes de transport</i>	16
1.2.3	Typologie de la dispersion	17
1.2.3.1	<i>Minéralogie des argiles</i>	17
1.2.3.2	<i>Mécanisme d'érosion par dispersion</i>	21
1.2.3.3	<i>Facteurs influençant la dispersion</i>	22
1.2.4	Synthèse	24
1.3	CARACTERISATION DE L'EROSION	26
1.3.1	Généralités	26
1.3.2	Dispositifs expérimentaux	27
1.3.2.1	<i>Essai d'érosion en canal (« Hydraulic Flume Test »)</i>	28
1.3.2.2	<i>Essai d'érosion par cylindre tournant (« Rotating Cylinder Test »)</i>	29
1.3.2.3	<i>Essai d'érosion par jet d'eau (« Jet Erosion Test »)</i>	30
1.3.2.4	<i>Simulateurs de pluie et de ruissellement</i>	33
1.3.2.5	<i>Essai d'érosion de trou (« Hole Erosion Test »)</i>	34
1.3.2.6	<i>Essai triaxial d'érosion (« Triaxial Erosion Test »)</i>	35

1.3.3	Corrélation de l'érosion avec les propriétés du sol.....	36
1.3.4	Quantification de l'érosion par des mesures directes.....	41
1.3.5	Interprétation des résultats	42
1.3.6	Limite de l'approche actuelle.....	44
1.4	CARACTERISATION DE LA DISPERSION.....	47
1.4.1	Essai pour l'identification de la dispersion du sol	47
1.4.1.1	Essai à l'aiguille (« Pinhole Test »).....	47
1.4.1.2	Essai d'émiettage (« Crumb Test »).....	48
1.4.1.3	Essai sédimentométrique en parallèle (« Double Hydrometer Test »).....	49
1.4.1.4	Zétamètre	51
1.4.2	Conclusions sur les essais de dispersion du sol	51
1.5	CONCLUSIONS	52

CHAPITRE 2 : APPROCHE EXPERIMENTALE ET PROPRIETES DES MATERIAUX TESTES 53

2.1	APPROCHE EXPERIMENTALE.....	53
2.2	PROPRIETES DES MATERIAUX TESTES.....	54
2.2.1	Matériaux bruts	54
2.2.2	Sols reconstitués par mélange de deux composants argiles/sable.....	56
2.2.3	Sols reconstitués par mélange de trois composants argile/limon/sable	57
2.3	DEMARCHE EXPERIMENTALE	59
2.3.1	Objectif.....	59
2.3.2	Amélioration/modification de protocoles existants	61
2.3.3	Programme expérimental	61
2.3.4	Répétitivité.....	63
2.4	CONCLUSIONS	63

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DE L'EROSION PAR L'ESSAI D'ERODIMETRE A JETS MOBILES 65

3.1	APPAREILLAGE ET PRINCIPE DES ESSAIS A L'EJM	65
3.1.1	Généralités	65
3.1.2	Appareillage.....	65
3.1.3	Echantillon d'essai	67
3.1.4	Protocoles d'essai.....	68
3.1.4.1	Protocole « Hénensal ».....	69
3.1.4.2	Nouveau protocole d'essai.....	69
3.2	R ESULTATS EN LABORATOIRE.....	69
3.2.1	Résultats selon le protocole « Hénensal ».....	69
3.2.2	Résultats selon le nouveau protocole d'essai.....	70
3.2.2.1	Évolution de la surface du sol.....	70
3.2.2.2	Evolution de la masse érodée et taux d'érosion.....	71
3.2.2.3	Dynamique d'érosion.....	73
3.2.2.4	Conclusion	77

3.3	RESULTATS IN SITU	78
3.3.1	Essai sur un remblai	78
3.3.1.1	<i>Contexte et objectifs</i>	78
3.3.1.2	<i>Résultats</i>	79
3.3.1.3	<i>Conclusion</i>	80
3.3.2	Essais sur des sols agricoles.....	81
3.3.2.1	<i>Contexte et objectifs</i>	81
3.3.2.2	<i>Réalisation des essais</i>	82
3.3.2.3	<i>Synthèse des résultats</i>	84
3.3.2.4	<i>Conclusion</i>	88
3.4	CONCLUSIONS	88

CHAPITRE 4 : CARACTERISATION DE L'EROSION PAR L'ESSAI D'EROSION DE TROU..... 91

4.1	APPAREILLAGE ET PRINCIPE DES ESSAIS.....	91
4.1.1	Généralité	91
4.1.2	Appareillage	91
4.1.3	Echantillon d'essai	93
4.1.4	Protocole d'essai	94
4.2	MODELE D'INTERPRETATION DES ESSAIS	95
4.2.1	Détermination de la contrainte de cisaillement et du taux d'érosion.....	96
4.2.2	Détermination du rayon instantané du trou et validation de notre approche de calcul.....	97
4.3	RESULTATS TYPIQUES ET OBTENTION DE LA LOI D'EROSION	102
4.3.1	Paramètres mesurés.....	102
4.3.2	Courbe typique de la loi d'érosion interne.....	104
4.3.3	Automatisation de l'exploitation des résultats	104
4.3.4	Loi d'érosion	106
4.3.5	Comparaison des résultats calculés selon la méthode de Wan et Fell	107
4.4	FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA LOI D'EROSION.....	108
4.4.1	Influence du pourcentage d'argile.....	108
4.4.2	Influence du type d'argile	110
4.4.2.1	<i>Essais avec l'argile de type Illite</i>	110
4.4.2.2	<i>Essais avec l'argile de type Montmorillonite</i>	111
4.4.3	Conclusion partielle	112
4.5	OBSERVATIONS MULTIECHELLES DES ECHANTILLONS AVANT ET APRES EROSION INTERNE	113
4.5.1	Observation à l'aide de moulage en cire	113
4.5.2	Observation avec le microscope électronique à balayage environnemental....	114
4.5.2.1	<i>Généralités sur la microscopie électronique à balayage environnementale (MEBE)</i>	115
4.5.2.2	<i>Observations des liaisons entre le sable et les argiles de type kaolinite ou illite ...</i>	116
4.5.2.3	<i>Influence du gradient hydraulique imposé sur l'évolution de la texture sableuse d'un échantillon au cours d'un essai de HET</i>	117
4.5.2.4	<i>Comparaison des textures sableuses contenant de la kaolinite ou de l'illite</i>	120
4.5.2.5	<i>Comparaison des textures argileuse contenant de la kaolinite ou de l'illite</i>	121
4.6	CONCLUSIONS	123

CHAPITRE 5 : CARACTERISATION DE LA DISPERSION 125

5.1	ESSAIS CLASSIQUES : RESULTATS ET LIMITES	125
5.1.1	Essai à l'aiguille : « Pinhole Test »	125
5.1.2	Essai d'émiettage : « Crumb Test »	128
5.1.2.1	<i>Résultats</i>	129
5.1.2.2	<i>Conclusions</i>	130
5.1.3	Essai de sédimentométrie en parallèle : « Double Hydrometer Test »	132
5.1.3.1	<i>Interprétation des résultats et discussion</i>	134
5.1.3.2	<i>Conclusions</i>	135
5.1.4	Synthèse des résultats des essais classiques	136
5.2	NOUVEL ESSAI DE D'EMIETTAGE (« CRUMB TEST » AMELIORE).....	137
5.2.1	Du « Crumb Test » normalisé au nouvel essai d'émiettage	137
5.2.2	Résultats obtenus au moyen du nouvel essai d'émiettage	141
5.2.2.1	<i>Dispersion des matériaux de référence</i>	142
5.2.2.2	<i>Dispersion des mélanges de matériaux de référence</i>	144
5.2.3	Influence du pourcentage et du type d'argile sur la dispersion mesurée avec le nouvel essai d'émiettage	154
5.2.4	Influence du fluide sur la dispersion mesurée avec le nouvel essai d'émiettage	156
5.3	APPORT DE LA ZETAMETRIE	159
5.3.1	Principe	159
5.3.2	Appareillage	161
5.3.3	Protocole de mesure	161
5.3.4	Résultats des mesures en zétamétrie	163
5.3.4.1	<i>Comportement des argiles de référence (kaolinite, illite et montmorillonite)</i>	163
5.3.4.2	<i>Influence de la concentration du sel sur le potentiel zéta</i>	164
5.3.4.3	<i>Influence de la nature du sel sur le potentiel zéta</i>	167
5.3.4.4	<i>Apport de la zétamétrie pour la caractérisation des particules fines issues d'un sol naturel : exemple du remblai de Montoire-sur-le-Loir</i>	169
5.3.5	Conclusions et poursuite de l'étude	170
5.4	CONCLUSIONS	171

CHAPITRE 6 : SYNTHESE ET COMPARAISON DES RESULTATS D'ESSAIS D'EROSION ET DE DISPERSION 173

6.1	SYNTHESE DES RESULTATS D'ESSAIS	173
6.2	COMPARAISON DES ESSAIS « HET » ET « EJM »	176
6.2.1	Coefficient d'érosion (HET) et taux initial d'érosion (EJM)	176
6.2.2	Contrainte critique de cisaillement (HET) et masse érodée finale (EJM)	177
6.3	COMPARAISON DU PHENOMENE D'EROSION ET DE DISPERSION	178
6.3.1	Comparaison entre l'essai à l'EJM, au HET et le Double Hydrometer Test ...	178
6.3.2	Comparaison entre l'essai au HET et l'essai d'émiettage	179
6.3.2.1	<i>Mélange : sable et kaolinite</i>	179
6.3.2.2	<i>Mélange : sable et illite</i>	179
6.3.2.3	<i>Mélange : sable et montmorillonite</i>	180
6.4	CONCLUSIONS	181

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES 183

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 187

ANNEXE A : FICHES DES MATERIAUX A1

ANNEXE B : PROTOCOLE D'ESSAI EJM A7

ANNEXE C : PROTOCOLE D'ESSAI HET A11

ANNEXE D : SYMBOLES..... A19

Introduction

ENJEUX ET PROBLEMATIQUE

Avec le réchauffement de la planète qui cause le dérèglement climatique, l'élévation du niveau des eaux, il est évident que les catastrophes naturelles liées à des événements pluvieux extrêmes et par la suite des inondations sont de plus en plus fréquentes et dévastatrices. Les ouvrages de protection contre les inondations sont très fortement sollicités parfois au-delà des limites de dimensionnement. Ce problème a été mis en lumière par les récentes inondations catastrophiques dans le Sud-Est de la France telles que celles qui se sont produites dans l'Aude (novembre 1999) ou le Gard (septembre 2002) et dont les dégâts cumulent un coût de plusieurs milliards d'euros et une vingtaine de vies humaines. Dans le reste du monde, la catastrophe due au phénomène d'érosion la plus connue est la rupture du barrage de Teton en 1976 aux Etats-Unis d'Amérique qui coûta 1 milliard d'euros. Plus récemment, le cyclone Katrina a dévasté la moitié de la ville de New Orléans en août 2005 en causant une gigantesque inondation suite à la destruction des digues de protection. Katrina a dévasté 233000 km² de terres, faisant plus de 1000 victimes et pour un coût d'environ 150 milliards d'euros de dommages. Les conséquences de ce cyclone sont visibles encore aujourd'hui dans cette localité.

La vulnérabilité des ouvrages géotechniques à leur interface avec un fluide est un axe de recherche important pour la maintenance du patrimoine. Il s'agit de limiter l'affouillement de fondations de ponts, l'érosion de remblai ou digues par exemple. Les écoulements superficiels et internes ne conduisent pas directement à la ruine de l'infrastructure, mais sapent alors l'infrastructure en réduisant sa stabilité d'ensemble sous la poussée des eaux et des charges de service. La combinaison de ces phénomènes, s'ils perdurent assez longtemps, menace de ruine l'ouvrage. Ces phénomènes de dégradation causés par l'eau communément regroupés sous la dénomination « érosion » sont la première cause de ruptures et d'incidents sur des barrages et des digues en France. Plus de 70 incidents de ce type ont été recensés en 25 ans par le Comité Français des Barrages et des Réservoirs (CFBR) de 1970 à 1995.

La France a un patrimoine important d'ouvrages de retenue hydraulique : 400 km de digues sur le Rhône, 700 km de levées sur la Loire, 6700 km de voies navigables, 1000 km de canaux hydroélectriques, des milliers de barrages, totalisant plus de 8000 km de digues protègent les villes et villages contre les inondations mais la plupart des ouvrages hydrauliques sont constitués par des remblais anciens (les premières constructions remontant au Moyen Age) édifiés par étapes, plus ou moins bien entretenus et d'une façon générale à la structure méconnue.

Devant ce contexte, le réseau Scientifique et Technique du Ministère de l'Ecologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire a lancé un programme de recherche pluriannuel sur la « Mise en charge hydraulique de remblais d'infrastructures de transports » dans le cadre de sa thématique « Risques naturels, vulnérabilité des ouvrages et des réseaux ». Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, Paris), division Mécanique des Sols, des Roches et Géologie de l'Ingénieur (MSRGI) contribue à cette opération de recherche par ce travail de thèse.

On signalera que durant la même période, un projet de l'Agence Nationale de Recherche (A.N.R) (2006-2008) et un projet national (2007-2010) tous les deux intitulés « Erosion interne dans les ouvrages hydrauliques » (ERINOH) ont été lancés en France (Fry, 2004). Au sein du thème « Seuil d'arrachement et cinétique d'érosion » des projets ERINOH, cinq phénomènes sont abordés : érosion de conduit, érosion régressive, érosion de contact, suffusion et colmatage.

Contrairement au problème de stabilité générale d'ouvrages, relativement bien connus maintenant, les phénomènes d'érosion qui comprennent l'érosion externe et l'érosion interne ne mènent pas directement à la destruction des ouvrages. Ils s'initient localement, sapent progressivement l'ouvrage avant de conduire brusquement à la rupture des digues, des barrages ou des remblais d'infrastructures de transport vitaux pour la société. La Figure 1 montre deux cas de rupture de remblais : routier et ferroviaire causés par l'érosion interne (Soudain, 2004).

L'évaluation de la résistance du sol à l'érosion est la question cruciale à se poser pour appréhender le problème. La quantification de la résistance du sol à l'érosion intéresse non seulement des géotechniciens mais aussi des aménageurs (Hénensal, 1986), des concepteurs d'infrastructure de transport, des concepteurs hydrauliques (Guiton, 1998) et des ingénieurs agronomes pour la conservation des sols cultivés (Wishmeier *et al.*, 1973).

Dans le domaine géotechnique, de nombreuses recherches ont été menées dans le passé pour étudier le phénomène. Les contributions significatives sont les travaux d'Arulanandan *et al.* (1973), Arulanandan et Perry (1983), Chapuis (1986a, b), Shaikh *et al.* (1988a), Briaud *et al.* (2001), Wan et Fell (2002, 2004). Or, la plupart de ces travaux de recherche se concentrent sur quelques aspects du problème d'érosion : soit l'influence des propriétés mécaniques, soit l'influence des propriétés physico-chimiques sur l'érosion. Quelques-uns travaillent sur des sols reconstitués, d'autres préfèrent les sols naturels. Certains mènent des recherches sur l'érosion se produisant à l'extérieur du massif ou « érosion externe », d'autres sur l'érosion se produisant dans une masse du sol ou « érosion interne ».

Or pour mieux comprendre le phénomène dans son ensemble, il est nécessaire d'étudier conjointement l'érosion sous différents aspects, avec des méthodologies d'essai, des techniques et des méthodes complémentaires en utilisant un même type de sol pour pouvoir comparer les résultats des essais et accéder ainsi à une meilleure connaissance du phénomène.



Figure 1: Illustration de la conséquence de l'érosion interne sur des infrastructures linéaires (Soudain, 2004)

La mise en suspension ou « dispersion » des particules fines dans les phénomènes d'érosion joue également un rôle particulier. La dispersion des particules argileuses dans le fluide est en relation étroite avec l'initiation de l'érosion du sol. Les contributions notables sur ce sujet sont les travaux de Sherard *et al.* (1976a, b), Decker et Dunnigan (1977), Holmgren et Flanagan (1977), Heinzen et Arulanandan (1977), Shaikh *et al.* (1988a, b) et Mitchell et Soga (2005). Cependant aucune recherche sur l'effet de la dispersion dans l'érosion n'est présente tandis que la relation entre ces deux phénomènes existe bel et bien.

OBJECTIFS ET DEMARCHES

L'objectif principal de cette thèse est d'arriver à une meilleure compréhension des phénomènes d'érosion et de dispersion auxquels sont sujets les ouvrages en terre constitutifs des infrastructures linéaires de transport. La connaissance du niveau de vulnérabilité de ces ouvrages géotechniques lorsqu'ils sont confrontés à une inondation est enjeu important pour la maintenance du patrimoine. Il s'agit de d'anticiper l'évolution du comportement de remblai ou digues soumis à l'érosion, de fondations de ponts lors d'affouillement par exemple. Les écoulements superficiels et internes ne conduisent pas directement à la ruine de l'infrastructure, mais sapent alors l'infrastructure en réduisant sa stabilité d'ensemble sous la poussée des eaux et des charges de service. La combinaison de ces phénomènes, s'ils perdurent assez longtemps, menace de ruine l'ouvrage.

Dans le cadre de ce travail, un programme de recherche portant sur le processus d'érosion et de dispersion par un fluide de la matrice argileuse des sols structurés a été mis en place. Cette étude a pour but de mieux comprendre les phénomènes mécaniques et physico-chimiques qui contrôlent l'initiation de l'érosion interne. Elle combine des études aux échelles macroscopique et microscopique utilisant différents types d'essais et d'appareillages. Pour l'aspect mécanique, deux types d'essais d'érosion sont étudiés. L'objectif est de proposer une loi d'érosion (équation d'érosion) du sol soumis à un écoulement. Pour l'aspect physico-chimique, le processus de dispersion et de floculation des argiles est étudié afin de relier le phénomène de dispersion d'origine physico-chimique au phénomène d'érosion d'origine mécanique et hydraulique, tous deux rencontrés dans le processus global d'érosion. Les expériences comprennent des essais au laboratoire et in situ. Les matériaux testés se composent de différentes textures du sol reconstitué au laboratoire.

Plus concrètement, ce travail comprend :

Premièrement, des mesures de la sensibilité à l'érosion du sol effectuées grâce à l'appareil Erodimètre à Jets Mobiles (EJM).

Deuxièmement, le développement et la validation d'un appareil d'érosion de trou du type « Hole Erosion Test » (HET) permettant de mesurer le taux d'érosion et la contrainte de cisaillement. Des protocoles d'essais pour différents types de sol ont été envisagés. Des observations à l'échelle microscopique du sol avant et après le processus d'érosion interne complètent cette étude.

Troisièmement, l'introduction et l'exploitation d'un appareil d'essai d'émiettement qui nous permet de mesurer quantitativement la dispersion du sol.

Finalement, la mise en évidence de la relation entre les processus d'érosion et la dispersion

PLAN DU MEMOIRE

Après cette partie introductive destinée à présenter les enjeux, la problématique et la démarche adoptée, le mémoire est structuré de la façon suivante :

Le chapitre 1 est consacré à l'état des connaissances dans le domaine de l'érosion et de la dispersion du sol par un fluide, les différentes méthodes de mesure de l'érosion. Il met en évidence également les difficultés pour quantifier le problème d'érosion.

Le chapitre 2 présente d'une part les approches expérimentales utilisées dans ce travail de thèse et qui comprennent des essais d'érosion et de dispersion, et d'autre part les propriétés des matériaux utilisés dans le programme expérimental.

Le chapitre 3 concerne l'étude de l'érosion du sol par des essais avec l'Erodimètre à Jets Mobiles (EJM) du LCPC. La description de l'appareillage, l'amélioration du protocole d'essai et la préparation des échantillons sont présentées.

Les résultats des essais obtenus au laboratoire et in situ sont montrés. Les paramètres testés pour montrer leur influence sur la sensibilité à l'érosion externe sont la texture du sol, le pourcentage d'argile, la méthode de traitement du sol.

Le chapitre 4 aborde l'étude de l'érosion du sol grâce à des essais avec l'appareil d'Erosion de trou de type « Hole Erosion Test » (HET) construit et développé au LCPC. Le paragraphe comprend la description de l'appareillage, son optimisation, les protocoles mis en place pour les différents matériaux étudiés ainsi que le mode de préparation des échantillons.

Les paramètres testés pour montrer leur influence sur la sensibilité cette fois-ci à l'érosion sont la texture du sol, le pourcentage d'argile, la minéralogie de l'argile. Des observations de la surface du sol avant et après l'érosion à l'aide du Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE) sont présentées.

Le chapitre 5 présente l'étude de la dispersion du sol. Ce problème est étudié par des essais classiques normés tels que le « Double Hydrometer Test », le « Crumb Test », le « Pinhole Test » et également par le nouvel essai d'émiettage (« Crumb Test modifié »). Un des apports de ce travail est d'avoir transformé l'essai d'émiettage afin d'avoir accès à un aspect quantitatif, alors qu'auparavant cet essai n'était que qualitatif. Des mesures à l'aide de la zétamétrie ont été réalisées en complément.

Les paramètres qui ont été testés sont la texture du sol, le pourcentage d'argile, la minéralogie de l'argile et le type du fluide.

Le chapitre 6 synthétise le comportement à l'érosion et de dispersion du sol. Une comparaison entre les deux essais d'érosion est réalisée. La relation entre l'érosion et la dispersion est mise en évidence.

La dernière partie résume les principales conclusions tirées de cette thèse ainsi que des recommandations pour les recherches à venir.

Pour finir, les annexes regroupent les fiches caractéristiques des matériaux utilisés (Annexe A), les protocoles d'essai de l'Erodimètre à Jets Mobiles (Annexe B) et du « Hole Erosion Test » (Annexe C) ainsi qu'un récapitulatif des principaux symboles utilisés dans le manuscrit (Annexe D).

Chapitre 1 : Erosion et dispersion du sol

L'objectif de notre travail est d'arriver à une meilleure compréhension des phénomènes d'érosion et de dispersion auxquels sont sujets les ouvrages en terre constitutifs des infrastructures linéaires de transport. La connaissance du niveau de vulnérabilité de ces ouvrages géotechniques lorsqu'ils sont confrontés à une inondation est enjeu important pour la maintenance du patrimoine. Il s'agit de limiter l'affouillement de fondations de ponts, l'érosion de remblai ou digues par exemple. Les écoulements superficiels et internes ne conduisent pas directement à la ruine de l'infrastructure, mais sapent alors l'infrastructure en réduisant sa stabilité d'ensemble sous la poussée des eaux et des charges de service. La combinaison de ces phénomènes, s'ils perdurent assez longtemps, menace de ruine l'ouvrage. Toutefois, la bibliographie n'est pas très riche en exemple de pathologie pour ces ouvrages sur lesquelles nous pourrions appuyer une analyse des mécanismes ayant conduit à la rupture. Nous présentons donc une analyse de pathologies d'ouvrages les mieux documentés : les ouvrages hydrauliques. Ces pathologies montrent l'importance de la nature des matériaux constituant les ouvrages sur le phénomène d'érosion.

Nous présentons ensuite les techniques expérimentales mises en œuvre pour étudier l'érosion des sols. L'objectif de ces travaux était de valider une méthode quantitative donnant la contrainte de cisaillement critique à l'interface eau-sol pour des matériaux naturels argileux.

1.1 PATHOLOGIES DES OUVRAGES DE RETENUE LIEES A L'EROSION

Un des premiers cas recensé de rupture par érosion interne d'un ouvrage en terre est celui du barrage en terre construit sur l'affluent du Nil, le wadi Garawi dont les restes sont toujours visibles. Ce barrage appelé Sadd el-Kafara par les Arabes a été construit sous la III^{ème} ou la IV^{ème} dynastie vers 2700 ou 2600 av. J.C. (Viollet, 2000). Il s'agit d'un ouvrage de 113 m de long, 14 m de hauteur, 100m à la base et 66 m en crête (Figure 1.1). Constitué d'un noyau central en tout venant, sable et graviers, il avait pour objectif de stocker l'eau pour un usage agricole.

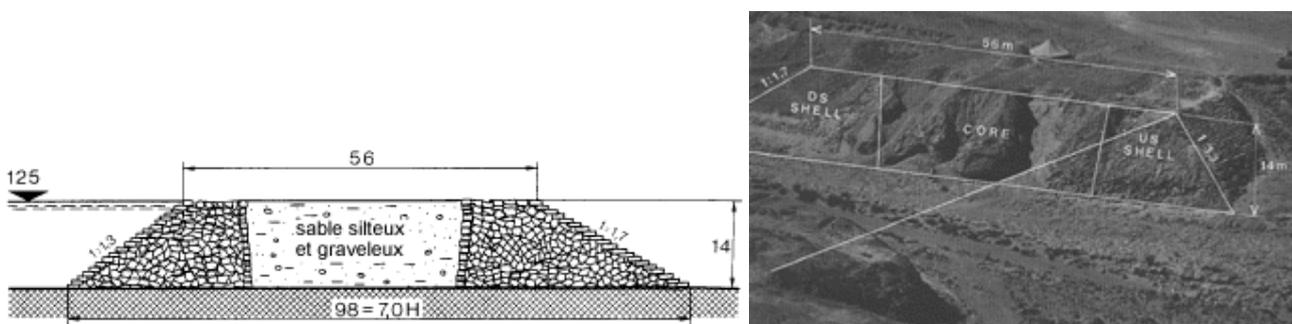


Figure 1.1 : coupe et restes du barrage de Sadd el-Kafara sur le wadi Garawi (Schnitter, 1994)

Garbrecht fait l'hypothèse que la rupture du barrage inachevé est due à l'érosion interne du noyau central et l'effondrement du parement amont lors d'une crue exceptionnelle (Garbrecht, 1984). Ainsi malgré la présence d'un déversoir, l'absence de noyau étanche a conduit à une destruction rapide de l'ouvrage.

Vers 1510, Léonard de Vinci décrit dans le Codex Leicester (folio 18r), de manière concise et dans un esprit technique : « A l'endroit où se rompt un barrage, l'eau vrille et affouille le fond, d'autant plus qu'elle s'écoule plus vite. Quand les eaux submergent des remblais, elles creusent le fond en arrière de ceux-ci et parfois le remplissent en avant d'eux. ». Il précise : « les berges submergées par des rivières en sont affectées très différemment de celles qui ne le sont pas...Le fond est attaqué d'une façon par une crue et d'une autre façon par une décrue...Les objets interposés entre des berges et le cours de la rivière protègent les berges...les dégradations des berges sont toujours provoquées par un approfondissement de leurs fondations...les berges fissurées en façade s'effondrent en direction de l'eau qui vient les frapper. » et poursuit « les obstacles engendrés par le mouvement de l'eau sur son fond évoluent lentement en direction du cours rapide des eaux , car l'eau qui les heurte déplace le sable du bas du monticule vers sa crête... et les parcelles les plus lourdes... dévalent le flanc opposé du monticule ... et ayant atteint le monticule, elles y restent. »

Ces lignes reflètent les nombreuses années d'expérience sur le terrain de l'ingénieur hydraulicien qu'est Léonard de Vinci. A leur lecture, on note que les mécanismes d'érosion y sont déjà formulés de manière claire.

Nous allons présenter ci-après plusieurs exemples de rupture de barrages en terre plus récents et détaillés afin de balayer les différentes causes de rupture.

1.1.1 Origines du phénomène d'érosion

Un ouvrage de retenue doit répondre à deux fonctions principales : l'imperméabilité de la structure et la résistance mécanique. Les événements initiateurs du phénomène d'érosion peuvent agir soit en affaiblissant la résistance mécanique de la structure, soit en dégradant son étanchéité par l'augmentation de la perméabilité locale ou globale de l'ouvrage. Ainsi, les origines du phénomène d'érosion se classent en deux groupes. Le premier cumule tous les éléments qui affaiblissent la résistance à l'érosion et le deuxième tient compte des percolations excessives, se produisant lorsque l'imperméabilité de la structure est dégradée.

Une faible résistance mécanique peut être due à :

- un mauvais compactage,
- l'absence ou l'inadéquation du filtre,
- l'utilisation de matériaux dispersifs (argiles, limons ou sables fins).

L'augmentation de la perméabilité locale de la structure est due aux problèmes :

- d'étanchéité inadéquate (mauvais choix des matériaux ou mauvaise liaison avec le contour),
- d'étanchéité endommagée (tassement différentiel, fracturation hydraulique),
- de l'existence d'un chemin privilégié pour l'écoulement (fissures préexistantes, défauts géologiques).

Les deux conditions qui assurent un bon fonctionnement de l'ouvrage de retenue se trouvent dans une relation interdépendance. Ainsi, si l'étanchéité du système est perdue, implicitement la résistance mécanique est elle aussi affectée, car l'augmentation locale de la perméabilité conduit à la dégradation de la structure.

Une étude statistique sur les barrages et les digues en terre en France réalisée par Royet (2005) a montré que les causes principales de rupture des ouvrages sont le compactage, l'hétérogénéité du sol (terrier des animaux, tuyaux traversant) et le gradient hydraulique.

1.1.2 Approche bibliographique

Une étude bibliographique a été réalisée sur les digues, les barrages en terre présentant des problèmes d'érosion en France, aux Etats-Unis ou en Australie (Mérieux *et al.*, 2004 ; Leonards *et al.*, 1991 ; Fell *et al.*, 2003 ; Foster *et al.*, 2000a, 2000b, Foster et Fell, 2001). Nous avons fait une synthèse sur le type, la composition et les propriétés mécaniques du sol de ces ouvrages afin de trouver des caractéristiques communes (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Synthèse des ouvrages en terre ayant des problèmes avec l'érosion

Digues et barrages	Composition du sol ¹			Limites d'Atterberg ²		Classification unifiée (USCS)
	% sable	% limon	% argile	w _L (%)	I _p (%)	
L.M.C.Boggy Creek (EU)	17	31	52	51	28	CL-CH
U.C Boggy Creek (EU)	29	41	29	28	12	CL
Potacocawa Y-31a-3 (EU)	0	92	8	27	0	ML
Potacocawa Y-31a-13 (EU)	0	78	22	46	19	CL
Big Sand Y-32-3 (EU)	29	56	15	32	16	CL
Big Sand Y-32-4 (EU)	0	74	26	46	23	CL
Pelucia Y-33a-1 (EU)	7	79	14	37	15	CL
Abiaca Y-34-8 (EU)	0	86	14	42	17	CL
Abiaca Y-34-10 (EU)	12	76	12	31	11	CL
Black Y-36-21 (EU)	0	82	18	41	16	CL
Black Y-36-37 (EU)	17	69	14	29	9	CL
Black Y-36-39 (EU)	2	82	16	31	8	CL
Cardinia (Australie)	62	19	19	37	18	SC
Auckland (Nouvelle Zélande)				36	11	SM
La Prade (France)	50	35	15	40	18	CL
Les Ouches (France)	70	20	10			
Le Buget (France)	20	50	30			
New Orleans S1 (EU)	10	90		65	43	CH
New Orleans S2 (EU)	33	67		49	32	CL
New Orleans S3 (EU)	9	91		54	35	CL-CH

EU : Etats-Unis ; CL : argile peu plastique ; CH : argile très plastique ; SM : sable limoneux ; SC : sable argileux

¹ La composition granulométrique est obtenue par les normes NFP 94-056 Analyse granulométrique : Méthode par tamisage à sec après lavage, (AFNOR, 1996), et NFP 94-057 Analyse granulométrique : Méthode par sédimentation (AFNOR, 1992)

² La plasticité est définie par l'indice de plasticité $I_p = w_L - w_p$ avec w_L limite de liquidité et w_p limite de plasticité. Ces limites sont déterminées selon la norme NF P 94-051 Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

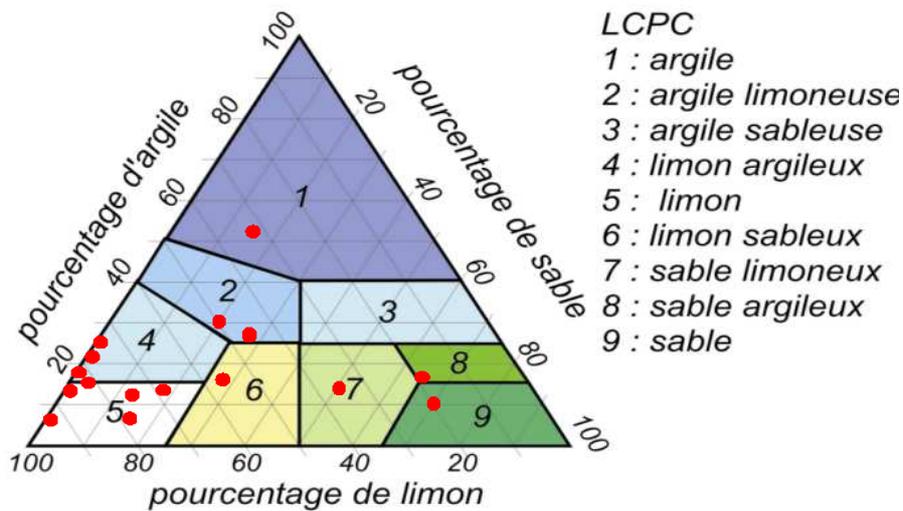


Figure 1.2 : Positions des sols des ouvrages du Tableau 1.1 dans le diagramme ternaire

Nous avons placé les sols des ouvrages dans le diagramme ternaire (diagramme qui tient compte du pourcentage des composants du sol tels que le sable, le limon et l'argile). Nous remarquons que les sols se répartissent sur le diagramme avec une localisation de plus de la moitié des ouvrages avec pathologie dans la partie limon argileux et limon (Figure 1.2). Nous montrerons dans les chapitres 4 et 6 que la résistance à l'érosion de ces deux types de sol est en général assez faible.

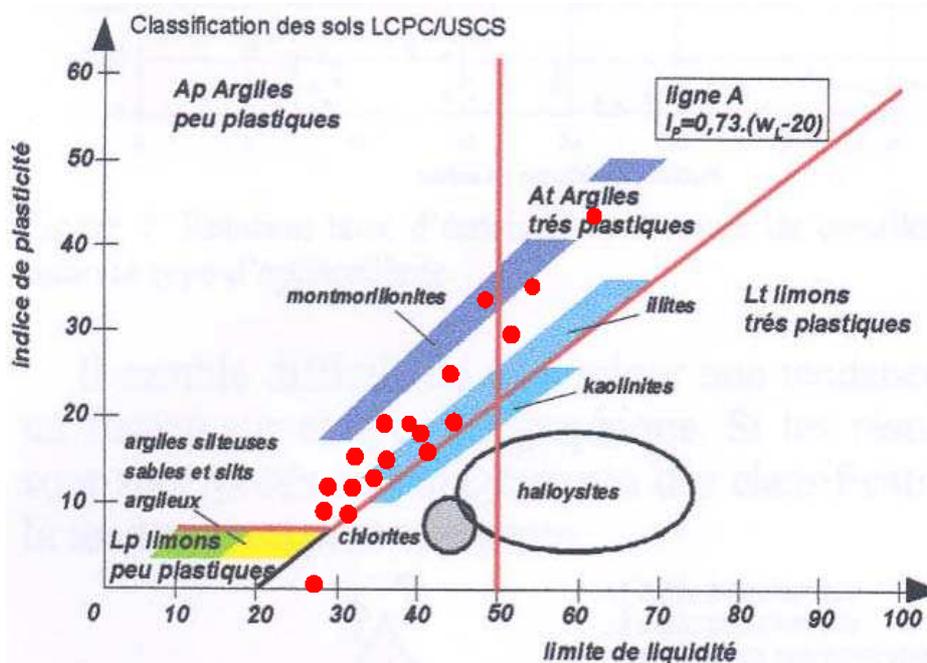


Figure 1.3 : Positions des sols des ouvrages du Tableau 1.1 dans le diagramme de Casagrande

Nous avons également positionné les sols des ouvrages dans le diagramme de Casagrande qui tient compte de la plasticité du sol en se basant sur la limite de liquidité et l'indice de plasticité. Nous constatons que la plupart des sols se répartissent dans la partie couvrant les argiles peu ou moyennement plastiques (Figure 1.3).

Le nombre de cas d'ouvrages en terre de type retenue présentant une pathologie reste cependant limité et conduit à considérer les conclusions sur les caractéristiques communes de leur sol que nous avons pu en tirer comme indicatives.

1.2 TYPOLOGIE DE L'ÉROSION ET DE LA DISPERSION

L'étude plus précise des phénomènes conduisant à la rupture d'ouvrages en terre soumis à une charge hydraulique nécessite au préalable une classification des phénomènes et une définition du vocabulaire. En effet, l'adéquation entre le vocabulaire utilisé, les phénomènes observés sont dépendants de la formation de l'observateur. Nous nous limiterons ici à présenter une typologie des érosions afin de mieux définir le domaine d'application des essais que nous décrirons dans les paragraphes suivants.

1.2.1 Typologie de l'érosion externe

L'érosion externe est la déstructuration de surface par arrachement et déplacement des particules d'un sol ou d'une roche sous l'action d'un agent extérieur naturel (eau, air, froid, chaleur, hygrométrie, gel, dessiccation...). Trois types d'érosion externe dues à l'eau sont identifiables : l'érosion pluviale, l'érosion fluviale, l'érosion maritime.

1.2.1.1 Érosion pluviale

Effet d'impact

Lorsque les gouttes de pluie arrivent sur le sol, elles créent une force tangentielle d'arrachement, proportionnelle à leur énergie cinétique, brisent les mottes et les agrégats et projettent les particules arrachées. Ce phénomène de rejaillissement sous l'impact, ou « splash » en anglais, déplace les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluie par rapport à la surface. Les particules fines déplacées sont piégées entre les éléments plus grossiers et ferment les pores : la surface du sol perd de sa capacité d'infiltration et sur certains sols, il apparaît une formation d'une pellicule ou d'une mince croûte superficielle, continue et consistante qui lors de la dessiccation provoque une croûte de battance (Rousseva *et al.*, 2002 ; Hénensal, 1986).

Ruissellement

Le ruissellement désigne le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Selon Guiton (1998), ce ruissellement, d'abord pelliculaire, se partage en un écoulement diffus en petits filets d'eau anastomosés (c'est-à-dire interconnectés) qui circulent entre les obstacles et un écoulement aréolaire (de forme circulaire) en nappes formées de lames d'eau qui suivent plus ou moins la topographie. Ces filets et ces lames d'eau peuvent exercer une force de cisaillement qui arrache des particules de sol.

La battance des gouttes détache des particules du sol et les transporte dans une faible proportion tandis que le ruissellement transporte les particules de sol libres et en détache dans une faible proportion (Bradford et Blanchar, 1999). Ces deux phénomènes sont représentés sur la Figure 1.4.

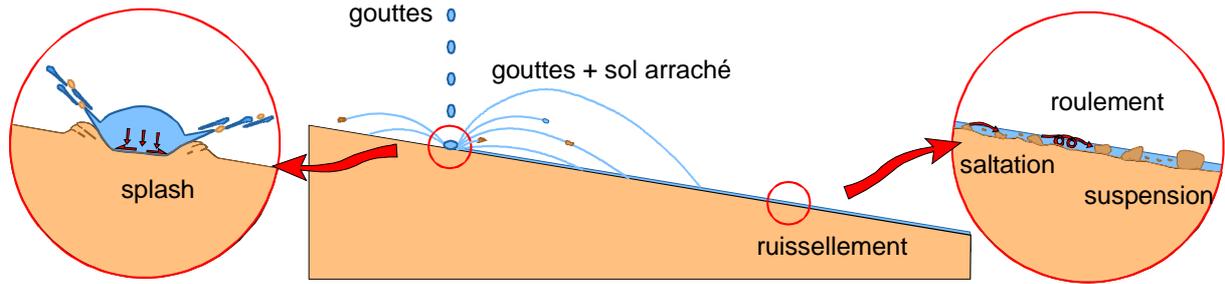


Figure 1.4 : Les deux mécanismes de l'érosion pluviale

1.2.1.2 La houle et les courants

Vagues dues à la houle

Lorsqu'à proximité du rivage, la profondeur de l'océan diminue, les vagues deviennent de plus en plus pentues, l'angle aigu en tête de vague décroît et un déséquilibre se produit entre la vitesse de l'eau en surface et sur le fond. La base de la vague est gênée dans son mouvement. La crête avance plus vite et tend à s'écrouler dans le creux qui la précède. La vague casse lorsque la profondeur d'eau descend en deçà d'une valeur critique, alors la crête de vague s'effondre, déferle et frappe la pente. La masse d'eau tombant sur la pente crée des contraintes d'impact (Figure 1.5a).

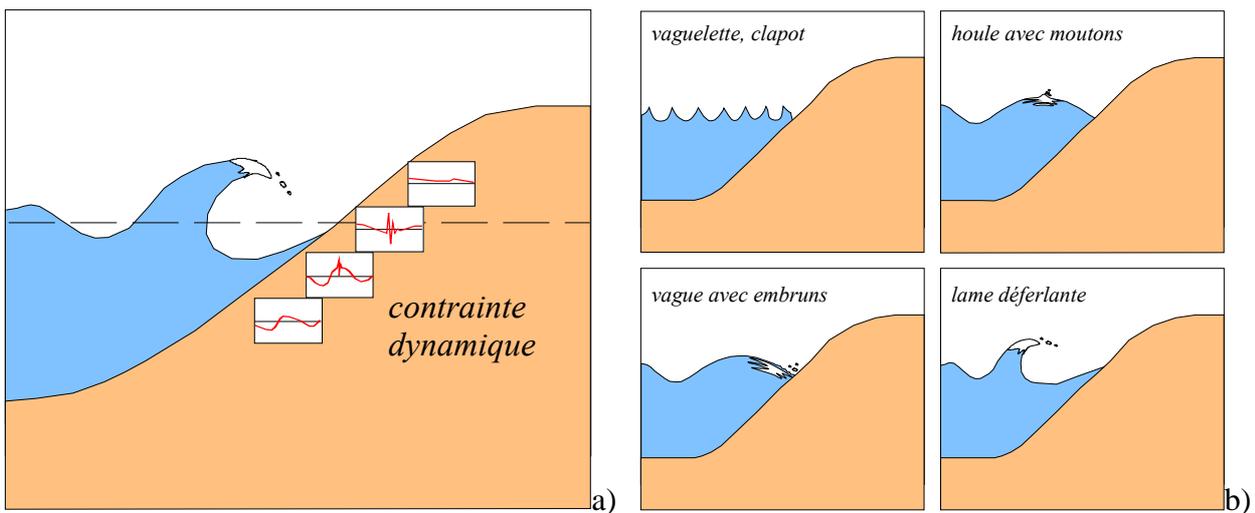


Figure 1.5 : (a) répartition des contraintes sur la pente (b) différents types de vague

La direction de propagation des vagues est dépendante de la topographie sous-marine. Pour une profondeur égale à la demi longueur d'onde d'un train de vagues, celles-ci tendent à se disposer parallèlement aux isobathes. On observe donc des divergences des crêtes de vagues, lorsqu'elles rencontrent une vallée sous-marine, et il existe une convergence après les reliefs immergés. Il y a donc dissipation de l'énergie dans les baies et, au contraire, concentration au niveau de caps.

Le mode de déferlement à la côte diffère donc en fonction de la bathymétrie et de l'énergie déployée par les agents de la morphogenèse (Figure 1.5b). Lorsque la plage sous-marine accuse une faible pente, la houle est dissipative ; au contraire, une forte pente génère une houle réfléctive.

Les efforts générés sont de deux sortes :

- la charge hydrostatique liée à la variation du niveau de l'eau,
- la surpression interstitielle liée à l'impact de la vague (Figure 1.5a).

Ces efforts se répartissent différemment le long de la pente :

- sous le niveau de l'eau, on observe une variation de la charge hydrostatique,
- dans une zone de transition, se superpose un signal oscillatoire,
- dans la zone d'impact, la charge prépondérante est le signal oscillatoire (impact et amortissement) et
- au-dessus de la zone d'impact de faibles variations de charge hydrostatique.

Le ressac peut créer une dépression propice à une rupture interne par glissement, due à une diminution des forces stabilisatrices et à une augmentation de la compressibilité de l'eau liée au phénomène de cavitation et à l'apparition de bulles d'air. Cette action peut produire la liquéfaction du sol.

La surface du talus est soumise à la fois à l'action de la masse d'eau "extérieure" due à la vague et celle de l'eau "interne" se déplaçant dans la partie superficielle mais déphasée par rapport à la première. C'est ce déphasage qui jouera donc un rôle important dans le processus de destruction de la carapace. Le déphasage dépend des caractéristiques géométriques, de la perméabilité de l'ouvrage, pour beaucoup de la période de la houle.

- Cas des périodes faibles : l'eau interne est en retard par rapport à la vague externe. La montée de la vague est alors contrariée, et la descente de l'eau est ralentie. L'effet destructeur est faible (même dans le cas des houles déferlantes et celles de hauteur croissante).
- Cas des houles de grandes périodes : l'eau interne et la vague sont en phase. Il y a donc un freinage de la vague faible. Le déferlement frappe une carapace vide d'eau, à l'intérieur de laquelle l'eau se dissocie, soit vers le haut en provoquant le franchissement, soit en s'écoulant rapidement vers le bas.

Les effets nocifs s'atténuent pour les houles de très grandes périodes pour lesquelles la vitesse des particules diminue.

Les houles les plus dangereuses, pour les talus d'enrochement, sont celles ayant une période d'environ 8 secondes.

Batillage

Ce battement de l'eau sur les berges dû au déplacement des bateaux ou au clapot voit son action érosive accentuée par une combinaison de facteurs comme la nature du substrat formant les berges et la vitesse d'écoulement dans le chenal. L'action des vagues finit par saper la berge et le substrat glisse peu à peu dans l'eau.

1.2.1.3 Marnage

Les variations du niveau de l'eau dans un cours d'eau peuvent être dues

- à la houle,
- au passage de navires (Figure 1.6),
- à l'action humaine : éclusage.

Les variations de niveau liées au passage de bateaux ont une période inférieure à la minute alors que les marées ont une période de quelques heures. La diminution de hauteur d'eau dans un canal lors du passage d'un bateau peut entraîner soit par diminution de pression soit par cavitation, l'apparition de bulles d'air. De ce fait, la compressibilité de l'eau est augmentée.

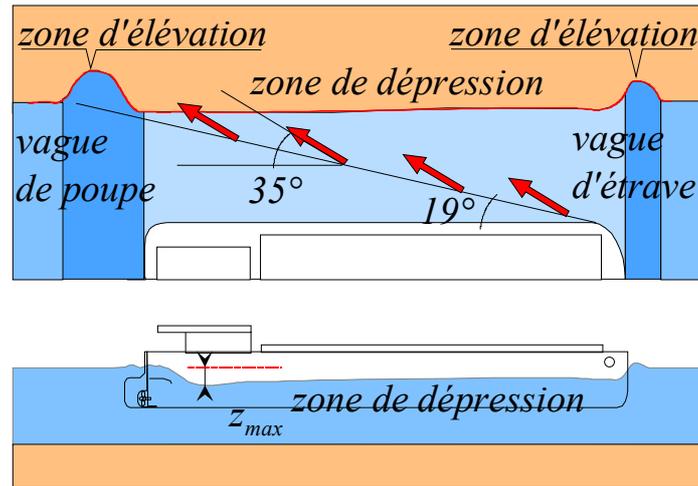


Figure 1.6 : schéma simplifié des différents types de vague générées par un navire.

Cela peut être produit aussi par l'élévation de la nappe phréatique lors de fortes houles du fait que la zone de déferlement est toujours plus grande que le ressac.

1.2.1.4 jet d'hélice et courant

Les courants naturels ou dus à des jets d'hélice imposent d'importantes forces érosives au terrain et l'érosion s'initie lors du dépassement de la vitesse admissible.

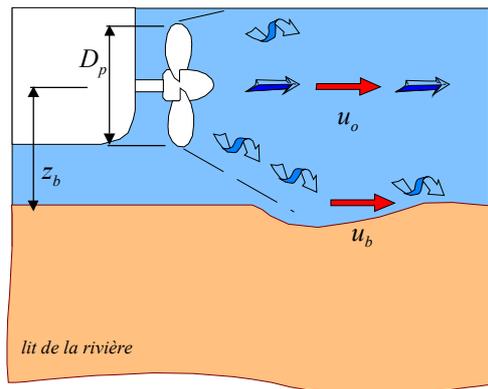


Figure 1.7 : jet d'hélice

Jets d'hélice

Depuis le début des années 70, l'érosion provoquée par les jets d'hélice et les risques associés d'endommagement des lits des cours d'eau navigables ont fortement augmenté sous l'effet de la puissance accrue des moteurs et du recours aux propulseurs latéraux sur les navires modernes (Figure 1.7). La vitesse provoquée en fond par le jet d'hélice dépend du type de manœuvre : démarrage ou manœuvre à vitesse lente ou navigation.

Courants fluviaux

En fond de cours d'eau (Figure 1.8)

L'érosion en fond de cours d'eau s'effectue dans l'espace de liberté à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales permettant une mobilisation des sédiments ainsi qu'un fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres. Cet "espace de liberté" qui est en passe de faire l'objet de réglementation n'est pas de même nature suivant le type de cours d'eau ; deux "styles fluviaux" principaux sont pris en compte : "les rivières à chenaux uniques et sinueux" et les "rivières en tresses". Cet "espace d'expansion" est défini par deux concepts: un concept morphologique (divagation maximale théorique du cours d'eau) et un concept de gestion qui dérive du précédent et qui permet de définir

"l'espace minimal à préserver pour permettre au cours d'eau de conserver son potentiel d'ajustement en plan et en long en fonction de l'évolution" des débits liquides et des débits solides.

L'érosion est principalement due au courant, qui au-delà d'une certaine vitesse, arrache puis entraîne les particules de sol. Ce phénomène dépend de la géométrie : pente des berges, largeur et courbure des chenaux, etc. Les efforts et contraintes de cisaillement provoquant l'arrachement sur le fond et les bords peuvent être estimés par la formule de Shields (1936).

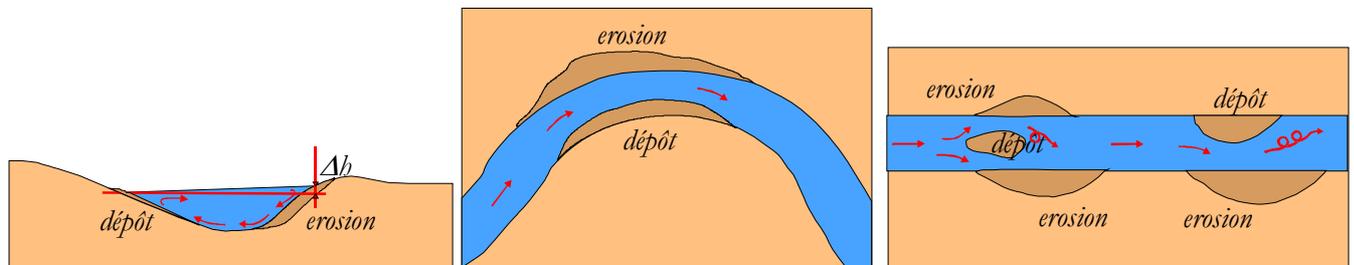


Figure 1.8 : les différentes actions de l'érosion fluviale

En France, les principales rivières concernées sont les rivières n'ayant pas fait l'objet d'aménagement (rivières libres) celles du Sud-Est, celles du Nord des Alpes, les affluents du Rhône et de la Durance ainsi que La Loire.

Au voisinage d'un Ouvrage

La présence d'un ouvrage provoque un rétrécissement qui entraîne une augmentation de vitesse à l'entrée (Figure 1.9) (LCPC et SETRA, 1980 ; Briaud *et al.*, 2003 ; compte rendu des congrès internationaux de la série ICSE). Il en résulte une concentration de tourbillons d'axes horizontaux se développant en forme de fer à cheval autour de l'obstacle. Ces fortes turbulences et les vortex dus à des discontinuités induisent des forces de soulèvement (composante verticale de l'écoulement) arrachant les matériaux du lit.

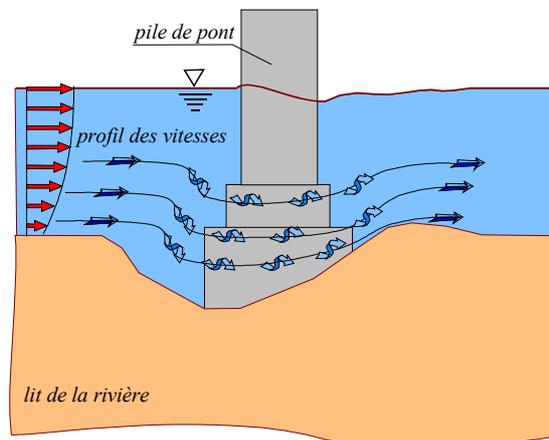


Figure 1.9 : turbulence autour d'une pile de pont

Courants marins

Le jet de rive provoqué par la houle est compensé par un courant de retour qui ramène l'eau vers le large en suivant le fond. Ce mouvement contraire à la direction de propagation des vagues accentue leur freinage à la base et amplifie le déferlement. Cet effet peut être atténué par la rugosité de la paroi rencontrée qui crée des frottements dissipateurs d'énergie.

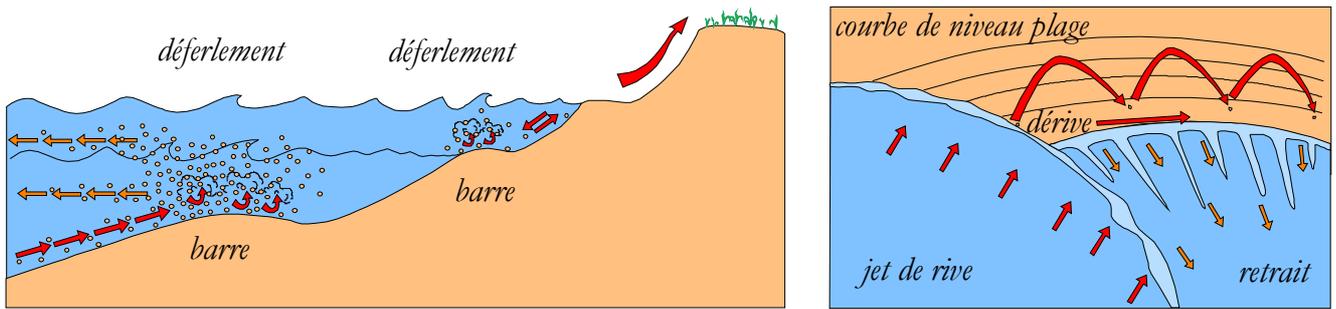


Figure 1.10 : mécanisme de l'érosion littorale

1.2.2 Typologie de l'érosion interne

L'érosion interne se développe s'il y a la combinaison de deux phénomènes : l'arrachement des particules et leur transport.

1.2.2.1 Les phénomènes d'arrachement

Les phénomènes d'arrachement conduisent à la déstabilisation d'une particule ou d'un groupe de particules, sous l'action d'une force mécanique (ou d'autres natures). On en distingue six : l'entraînement, l'érosion régressive, le débouillage, la boulangerie, la dissolution, la défloculation (CFGB, 1997).

L'entraînement

L'entraînement est défini comme le détachement des particules des parois d'une conduite, sous l'effet de l'écoulement d'un fluide. Ce phénomène a lieu à partir d'une valeur seuil de la contrainte de cisaillement appliquée par le fluide sur la paroi. Celle-ci dépend de la vitesse du fluide ainsi que de la résistance du sol à cette sollicitation (Figure 1.11).

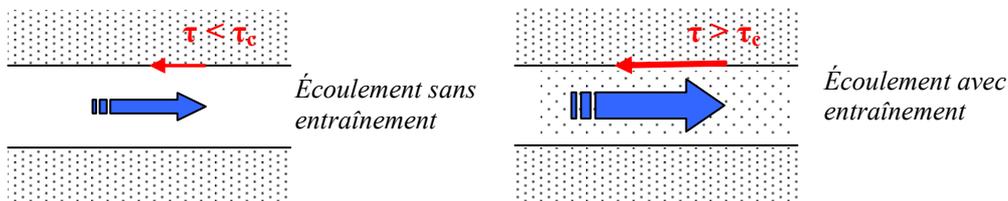


Figure 1.11 : Phénomène d'entraînement

L'érosion régressive

L'érosion régressive est le phénomène d'arrachement des particules de sol une à une, sous l'effet de la pression du fluide qui percole à travers le remblai. Ce processus apparaît d'abord à l'aval de l'ouvrage pour se propager ensuite vers l'amont. Il y a alors formation d'un renard hydraulique (Figure 1.12).

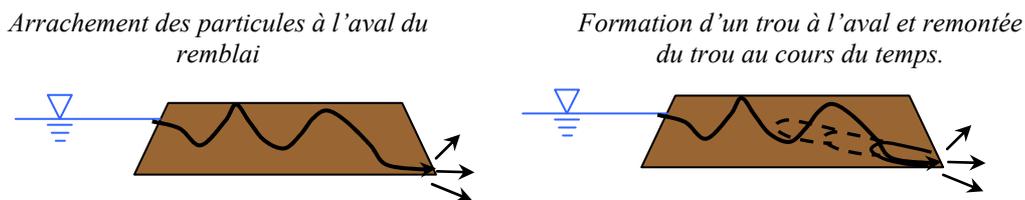


Figure 1.12 : Phénomène d'érosion régressive

Le déboufrage

Le déboufrage correspond à l'arrachement brutal d'un volume de sol déséquilibré par l'action de la poussée de l'eau à l'intérieur d'un massif rocheux. Ce phénomène se produit lorsqu'une fissure ou un conduit karstique est rempli de matériau argileux et que l'arrivée soudaine de l'eau provoque le déplacement de l'ensemble du matériau. Il en résulte l'apparition d'une cavité ou un élargissement ponctuel du conduit (Figure 1.13).

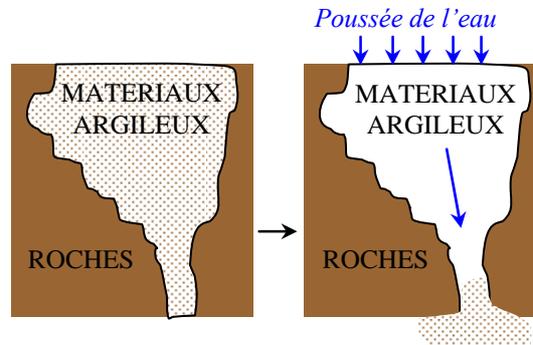
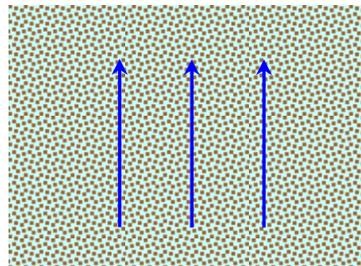


Figure 1.13 : Phénomène de déboufrage

La condition de boullance

La boullance est un phénomène qui apparaît principalement dans les sols pulvérulents, lorsque le gradient hydraulique dû à un écoulement d'eau est vertical ascendant. Il s'agit d'un phénomène d'instabilité générale. Sous l'influence de l'écoulement, le sol vient à se comporter comme un liquide. En effet, lorsque la pression de l'eau sur le sol est suffisante pour compenser le poids déjaugé des particules, la contrainte effective entre grains s'annule et les particules de sol flottent dans une phase liquide continue (Figure 1.14).



Flottaison des grains de sol sous gradient hydraulique vertical ascendant

Figure 1.14 : Phénomène de boullance

La dissolution

La dissolution, contrairement aux processus précédents, n'est pas un phénomène d'arrachement mécanique mais chimique. Elle correspond à la transformation par réaction chimique ou thermique d'un élément constitutif des particules de sol. En modifiant la composition des grains, la dissolution provoque l'altération des caractéristiques mécaniques du sol et peut être un facteur de déclenchement de l'érosion interne.

La défloculation

La défloculation est un phénomène de désagrégation des agglomérats de particules ou de feuillettes d'argile. Par action à la fois chimique et mécanique, elle favorise leur déplacement, donc leur dispersion.

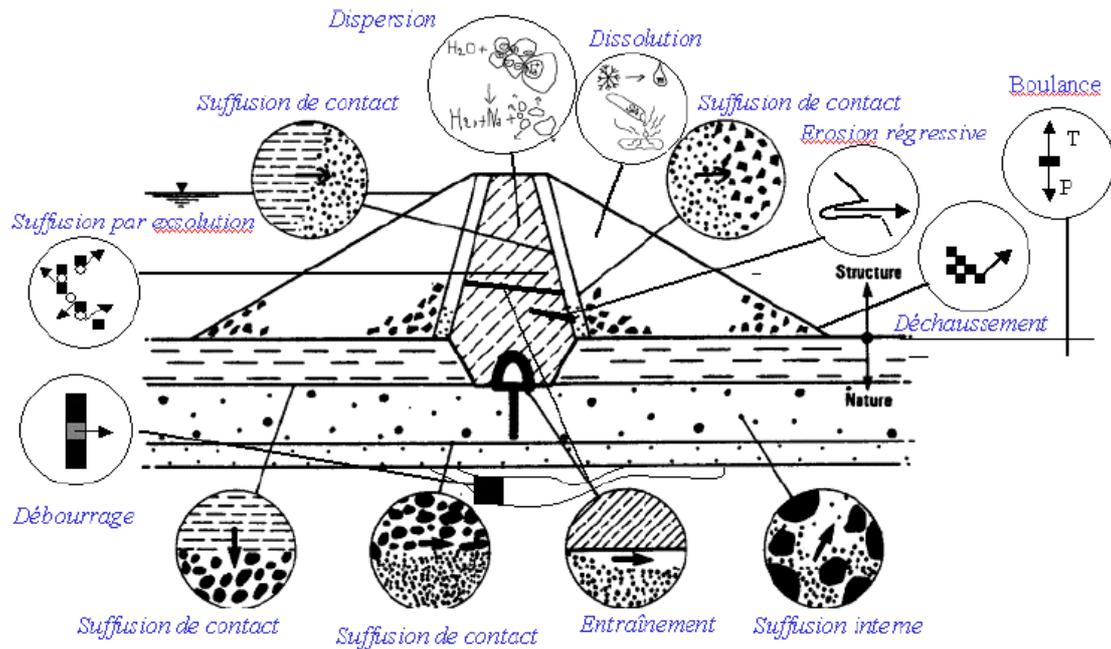


Figure 1.15 : Schéma représentatif des divers phénomènes initiateurs de l'érosion dans un barrage (adapté de Schuler et Brauns 1996, cité par Blais, 2004)

Les diverses conditions de déclenchement de l'érosion interne peuvent se combiner entre elles dans un incident et être difficilement distinguées (Figure 1.15). Mais elles ne sont pas suffisantes pour entraîner la rupture, il faut aussi que les conditions du transport des particules soient assurées, pour que l'érosion soit entretenue.

1.2.2.2 Les phénomènes de transport

Le renard hydraulique

Le renard hydraulique apparaît dans un ouvrage de génie civil lorsque l'écoulement d'eau à travers celui-ci se fait selon un chemin préférentiel (Figure 1.16). Le long de ce chemin se trouvent des points faibles affectés par des phénomènes d'érosion (érosion régressive ou boullance). Si ces points faibles ne sont pas entourés par des zones stables limitant leur expansion, il y a alors formation d'un trou continu de l'aval vers l'amont, la vitesse d'écoulement à travers l'ouvrage augmente et accélère ainsi le processus de ruine en cours.

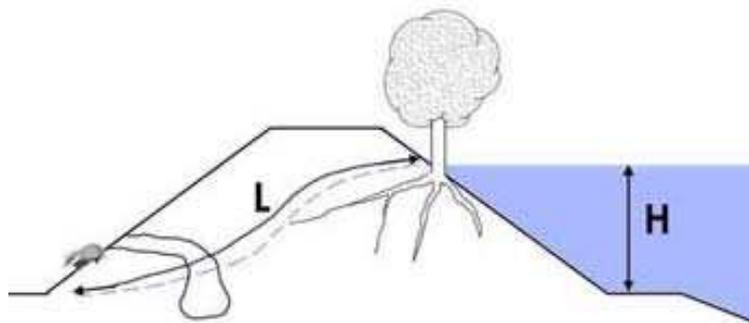


Figure 1.16 : Phénomène de renard

La suffusion

La suffusion est un phénomène de migration des petites particules à travers le squelette constitutif d'un sol (Skempton et Brogan, 1994). Il en résulte une redistribution des fines dans le sol qui s'apparente à une migration massive des particules fines (Figure 1.17).

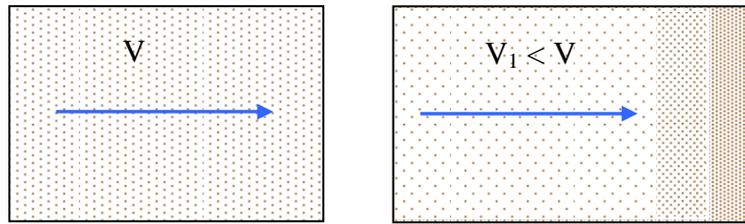


Figure 1.17 : Phénomène de suffusion

- La suffusion peut être un élément déclencheur de l'érosion régressive à l'aval de l'ouvrage, la migration des fines permettant à l'eau de s'écouler plus rapidement. Le phénomène d'érosion régressive peut ensuite remonter jusqu'à l'amont, comme vu précédemment, et favoriser la création d'un renard.
- L'entraînement des matériaux peut également se faire en tête de remblai, créant ainsi un affaissement de la crête et pouvant aboutir en période de crue à l'immersion du remblai.
- Enfin, la migration des particules fines accroît le risque de colmatage et en conséquence les pressions interstitielles peuvent augmenter en un point localisé du remblai. Si ce point est à l'aval, il va se former une zone instable qui menacera l'ouvrage de ruine.

1.2.3 Typologie de la dispersion

La dispersion du sol exprime la possibilité pour les particules constituant le matériau de défloculer. Dans la zone affectée par la défloculation, le matériau se transforme en une suspension colloïdale de particules très fines dispersées dans l'eau (Van Olphen, 1963). Une campagne de recherche sur la défaillance des digues et des barrages a été menée en Australie et aux États-unis par Sherard *et al.* (1972a ; 1972b ; 1977) et a confirmé la forte influence de la dispersion dans le processus d'érosion.

Dans ce paragraphe nous allons rappeler dans un premier temps quelques notions de minéralogie des argiles, puis regarder le mécanisme d'érosion par dispersion et les facteurs qui l'affectent.

1.2.3.1 Minéralogie des argiles

Les argiles sont les produits de décomposition des roches siliceuses par désagrégation physique et mécanique puis par altération chimique. La famille des minéraux argileux regroupe tous les silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates. Les minéraux argileux ont une structure ionique telle qu'ils interagissent fortement avec les molécules polaires de l'eau : ces minéraux sont entourés d'une couche d'eau fortement liée qui influence grandement le comportement macroscopique de ce matériau. Une particule d'argile est formée d'un empilement de feuilletés élémentaires constitués par l'association de deux unités structurales de base : le tétraèdre de silice et l'octaèdre d'alumine.

Le tétraèdre de silice est formé de 4 atomes d'oxygène entourant un atome de silicium équidistant de chacun d'eux. Ces tétraèdres se combinent selon un arrangement plan hexagonal, les atomes d'oxygènes étant dans un même plan et chacun d'eux étant commun à

deux tétraèdres (Figure 1.18). Un des atomes d'oxygène possède une valence libre et peut être mis en commun avec un autre feuillet.

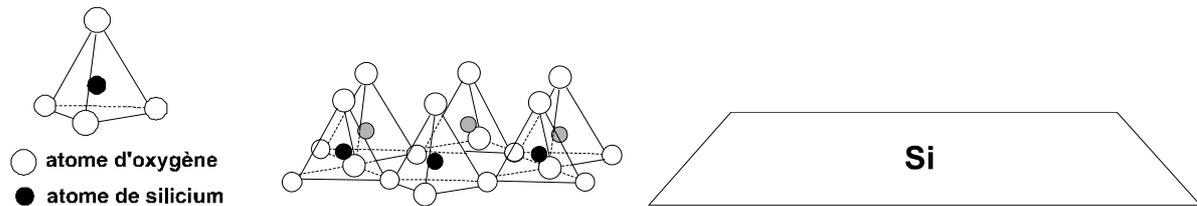


Figure 1.18 : couche octaédrique de silice et couche octaédrique d'alumine

L'octaèdre d'alumine est constitué de 6 hydroxyles entourant un atome d'aluminium ou de magnésium équidistant de chacun d'eux. Ces octaèdres se combinent entre eux pour former une couche plane (Figure 1.19).

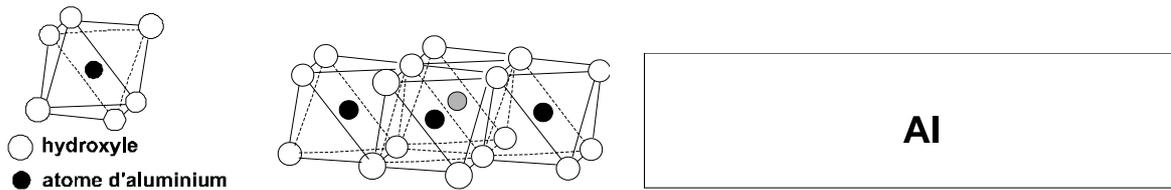


Figure 1.19 : couche octaédrique de silice et couche octaédrique d'alumine

Les feuillets d'argile sont alors une combinaison de ces unités de base. Le feuillet élémentaire idéal d'argile se compose d'un empilement de 2 ou 3 unités de base. Les liens de covalence et les liaisons ioniques assurent les liaisons rigides du feuillet élémentaire ; des liaisons moins fortes, mais très importantes et essentielles, assurent l'assemblage des feuillets élémentaires pour former les particules d'argile qui comportent un nombre de feuillets plus ou moins important suivant le type d'argile.

Les forces de liaison entre feuillets sont principalement, les forces d'attraction moléculaires de Van der Waals, la liaison hydrogène et les liaisons dues aux substitutions isomorphes.

- Les forces d'attraction moléculaires de Van der Waals sont des liaisons faibles.
- Les liaisons hydrogènes se forment avec des atomes fortement électronégatifs, dans le cas des argiles, généralement l'oxygène.
- Les substitutions isomorphes consistent dans le remplacement de certains cations constitutifs du réseau cristallin par d'autres de moindre valence, ce qui crée des déficits de charge qui affaiblissent les forces ioniques de liaison entre les feuillets (remplacement d'un Si^{4+} par un ion Al^{3+} dans la couche tétraédrique de silice, d'un ion Al^{3+} par un ion Mg^{2+} dans la couche octaédrique d'alumine...). Les particules d'argiles acquièrent une charge négative et peuvent adsorber de façon réversible des cations et des dipôles d'eau pour atteindre l'électroneutralité. La capacité d'échange ionique (C.E.C.) permet de mesurer cette charge et représente la charge positive nécessaire pour arriver à l'électroneutralité (milliéquivalents/100 g d'argile sèche).

Nous allons d'abord présenter les différents types d'argile puis nous exposerons ces phénomènes plus en détail dans les paragraphes suivants.

Les particules d'argile sont donc soumises à un ensemble de forces d'attraction et de répulsion qui varient avec la teneur en eau et dépendent des substitutions isomorphes. Malgré la simplicité apparente de la structure des argiles, on en dénombre un très grand nombre d'espèces qui se distinguent par les défauts liés à ces substitutions isomorphes au moment de la formation. L'arrangement des particules de sols argileux, qui interagissent avec l'eau et les ions qu'elle transporte, dépend beaucoup du milieu de déposition (notamment de sa salinité).

Les trois types les plus couramment rencontrés sont la kaolinite, l'illite et la smectite.

La kaolinite $(Si_2O_5)Al_2(OH)_4$

Le feuillet élémentaire est composé d'une couche de silice et d'une couche d'alumine. La liaison entre les deux couches se fait par substitution de certains (OH)- par des oxygènes O²⁻. Entre différents feuillets de kaolinite, le contact se fait entre un plan contenant les ions hydroxyles (OH)- de l'octaèdre et celui contenant les atomes d'oxygène O²⁻ du tétraèdre. Les liaisons entre feuillets sont l'effet composé de liaisons hydrogène et de forces de Van der Waals qui confèrent à l'ensemble une structure stable qui n'est pas affectée par la présence d'eau. La particule de kaolinite comporte 100 à 150 feuillets qui lui donnent une épaisseur de 0,1 µm et une largeur de 1 µm.

L'illite $[(Si_{4-n}Al_nO_{10})]Al_2Kn(OH)_4$

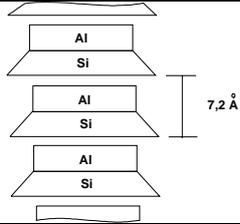
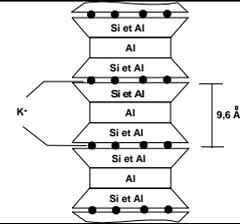
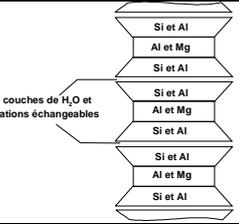
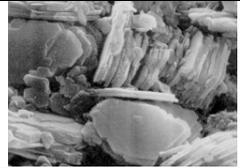
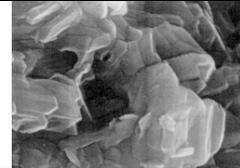
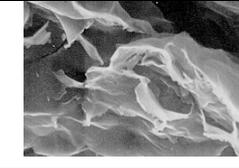
Le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine entre deux couches de silice. Dans les couches de silice un ion Si⁴⁺ sur quatre est remplacé par un ion Al³⁺. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par les ions potassium K⁺ qui assurent des liaisons assez fortes entre les feuillets. La particule d'illite comporte une dizaine de feuillets qui lui donne une épaisseur de 10 nm et une largeur de 0,3 µm. Le trou hexagonal du feuillet de silice correspond à l'atome K⁺ qui en le comblant crée un lien fort entre les couches.

La smectite $(Si_4O_{10})(Al_{5/3}Mg_{1/3})Na_{1/3}(OH)_2$

Le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine entre deux couches de silice, comme l'illite. Dans les couches d'alumine un ion Al³⁺ sur quatre est remplacé par un ion Mg²⁺. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions Ca²⁺ (montmorillonite calcique) ou par des ions Na⁺ (montmorillonite sodique). La valence des ions sodium étant plus faible que celle des ions calcium, c'est la montmorillonite sodique qui aura la plus grande surface spécifique et la plus grande C.E.C. Les liaisons entre feuillets étant très faibles, ces argiles sont très sensibles à la teneur en eau et ont un fort potentiel de gonflement et de retrait. L'épaisseur d'une particule de montmorillonite peut être très faible puisque, contrairement aux autres argiles, on peut isoler un feuillet élémentaire.

Les caractéristiques de ces argiles et des images prises au Microscope Électronique à Balayage sont rassemblées dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Caractéristiques des argiles

Nom	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Type	1:1	2:1	2:1
Nombre de feuillets par particule	100-150	10	1
Diamètre d'une particule (μ)	1	0,3	0,1
Épaisseur d'une particule (μ)	0,1	0,01	0,001
Surface spécifique en m ² /g	20-70	65-180	800
C.E.C. en meq/100g	3-15	10-40	80-150
rapport surface des bords/surface totale	0,12	0,06	0,02
Structure feuillet			
photo au Microscope Electronique à Balayage			

Les interstratifiés

Il existe bien entendu des minéraux interstratifiés formés d'un empilement régulier ou irrégulier de feuillets de deux types différents et dont l'un des feuillets est de type smectite et dont le comportement peut s'avérer gonflant (corrensite, tosudite, kaolinite-montmorillonite, saponite-chlorite, montmorillonite-mica, illite-montmorillonite).

Au niveau de la pratique, ces propriétés liées à la minéralogie de l'argile sont définies par les limites d'Atterberg. On utilise pour cela le diagramme de Casagrande qui permet de classer la fraction argileuse selon sa sensibilité à l'eau (Figure 1.20). On emploie alors le terme de plasticité. Ce diagramme a été construit à partir de nombreuses constatations expérimentales. Ces limites sont un élément essentiel des classifications des sols.

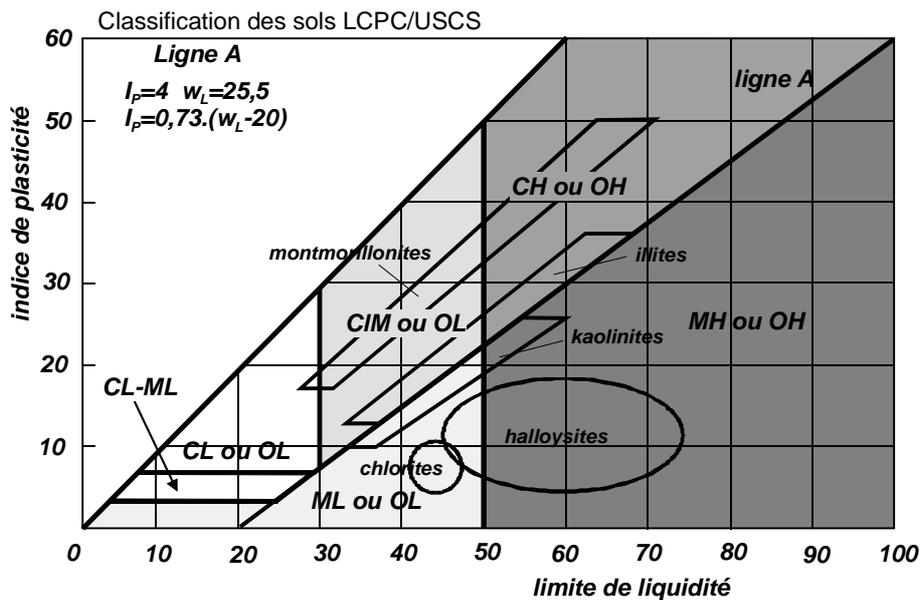


Figure 1.20 : Diagramme de Casagrande

La phase solide c'est-à-dire les microstructures rencontrées sont plus ou moins dispersées et orientées de façon privilégiée dans une direction. Nous retiendrons que la pesanteur joue un rôle secondaire dans l'arrangement des particules d'argiles et que les forces dominantes sont les forces d'attraction et de répulsion électrique, qui conditionnent le volume occupé par une masse donnée de particules d'argile. Les divers arrangements représentent généralement la différence de teneur en eau.

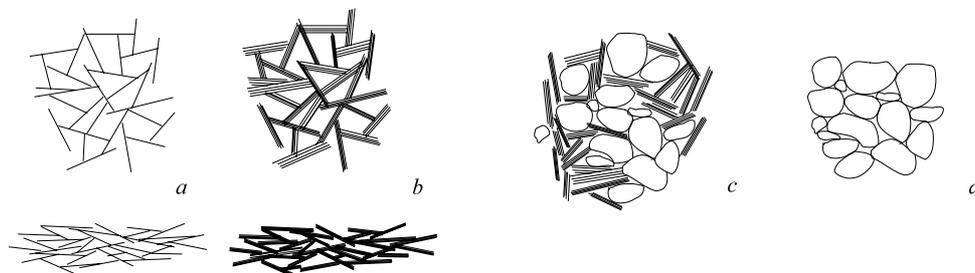


Figure 1.21 : a) flocculé mais dispersé (assemblage orthogonal et parallèle) b) flocculé et agrégé (assemblage orthogonal et parallèle) c) sable ou silt interagissant avec des plaquettes d) silt ou sable

Les différents modes d'associations de plaquettes d'argiles et de grains sont représentés sur la Figure 1.21. La flocculation des particules d'argile (qui leur fait occuper un plus grand volume) est favorisée par l'augmentation de la concentration en électrolyte (par exemple le chlorure de calcium), de la valence des ions et de la température (Mitchell et Soga, 1976 ; Grim, 1962) et elle diminue quand augmente la constante diélectrique, la taille des ions et le pH. Le résultat final de ces interactions physico-chimiques des particules lors de la sédimentation des argiles est qu'il existe des structures plus ou moins lâches.

1.2.3.2 Mécanisme d'érosion par dispersion

Pour mieux expliquer la perturbation qui apparaît à l'intérieur de la microstructure argileuse et qui favorise la dispersion des particules, quatre mécanismes distincts interviennent dans l'érosion par dispersion : l'hydratation, la désaération, le gonflement et finalement la dispersion proprement dite (Holmgren et Flanagan, 1977).

L'hydratation et la désaération sont les premiers processus physiques qui conduisent à la désintégration d'un grumeau de sol non saturé, qui est constitué par un assemblage de particules. L'assemblage est détruit violemment quand l'eau moléculaire arrive à sa position d'équilibre, du point de vue énergétique, à la surface des particules. De plus, si le front d'hydratation pénètre à l'intérieur du sol, l'air subit une compression qui engendre une pression. Les deux processus, hydratation et désaération, continuent jusqu'au moment où l'argile est complètement mouillée et que toutes les bulles d'air se sont échappées (sol complètement saturé). Le matériau qui en résulte perd sa structure initiale. Ces processus sont très rapides, habituellement ils durent quelques minutes là où le sol est effectivement en contact avec l'eau.

Le gonflement et la désagrégation constituent la deuxième étape du phénomène de destruction d'un sol par dispersion. Le gonflement apparaît lorsque la concentration ionique à l'intérieure de la phase solide (matrice de sol) est plus grande que celle de la solution qui l'entoure (liquide d'érosion). Autrement dit, les micelles argileuses étant entourées d'un essaim d'ions retenus par attraction électrostatique, il existe une différence de concentration en électrolytes entre la solution et le voisinage immédiat des particules. L'eau a, par conséquent, tendance à réagir en vue d'une égalisation des concentrations. Il se produit en

quelque sorte une pénétration de l'eau dans les pores, ce qui se traduit par une pression osmotique plus élevée, qui provoque la dilatation de la masse de sol.

La concentration ionique dans la solution interstitielle du sol a deux origines : l'existence de sels libres (ions non-liés électrostatiquement à des micelles d'argile) dans l'eau interstitielle et l'existence d'ions neutralisés par les charges électriques localisées à l'intérieur des particules. Le gonflement développé par les sels libres diminue au fur et à mesure que ces sels sont lavés par l'action de l'eau (dissolution). Les ions liés ne peuvent pas être libérés par diffusion. Par conséquent, les particules de sol retiennent de l'eau et des sels. Le sol s'imprègne d'eau et gonfle, les particules se séparent progressivement et les forces d'attraction diminuent en intensité. Le résultat de ce processus est la fissuration de la masse solide.

La dispersion proprement dite se produit lorsque le processus de relâchement des particules est suffisamment grand pour produire un fort déplacement relatif entre les particules (feuillettes) constituant le sol. Selon le comportement observé on qualifiera cette dispersion comme une défloculation ou une dissolution.

1.2.3.3 Facteurs influençant la dispersion

La principale propriété de l'argile renseignant sur la susceptibilité à la dispersion du matériau est la quantité de sodium Na^+ qui joue le rôle de cation compensateur de la charge négative portée par les feuillettes argileux. D'autres facteurs influencent également le phénomène. Nous présentons ici les principaux facteurs mis en évidence par Holmgren et Flanagan (1977) et Raudkivi et Tan (1984).

La présence des ions sodium

Le sodium agit comme un agent dispersant principalement en raison de sa charge ionique +1 et du rayon important de l'ion hydraté. Le nombre de cations monovalents de sodium qui sont attirés par les feuillettes d'argile pour réaliser l'équilibre électrique est deux fois plus grand que le nombre de cations divalents. Aussi, le potentiel osmotique (qui est directement proportionnel au nombre d'ions présents dans le système) est plus grand.

De plus, à cause de sa monovalence, les forces d'attraction entre le feuillet d'argile et l'ion sodium sont moins fortes que pour les ions di- ou trivalents. Par conséquent, les ions sodium se rangent préférentiellement vers la surface des particules et ont une action répulsive qui éloigne celles-ci. Dans ces conditions, les forces d'attraction de type Van der Waals sont faibles et la dispersion devient possible.

Ainsi, les ions sodium arrivent à initier la dispersion par création d'un grand potentiel osmotique lors du mouvement de l'eau entre les particules et par augmentation de la répulsion entre les particules.

Les ions calcium ou magnésium divalents et d'aluminium trivalent sont d'autres ions que l'on trouve habituellement dans le sol. Ces cations ont tendance à inhiber le phénomène de dispersion. L'ion potassium a lui aussi une charge ionique +1, mais il peut être plus facilement incorporé dans la structure cristalline de l'argile (le rayon de K^+ hydraté est plus petit que celui de Na^+ et cet ion perd plus facilement son cortège de molécule d'eau d'hydratation que Na^+). En conséquence, l'ion K^+ aura une influence plus faible sur la dispersion par rapport à l'ion Na^+ .

Le mode d'empilement des feuillets d'argile

Le mode d'empilement de feuillets identiques ou de type différent peut donner une explication valable de la dispersion spontanée même à de faibles concentrations de sodium dans la structure argileuse.

Il est bien connu que les particules d'argile de type montmorillonite se présentent en paquets constitués d'un conglomérat de quatre à neuf feuillets empilés en parallèle. Ce type de structure présente une préférence pour les ions calcium dans les couches intérieures de l'empilement. Ainsi se produit une réorganisation des cations attirés. Les ions sodium se localisent en surface de l'empilement des feuillets et la concentration sodique augmente fortement. La surface externe de l'empilement sera recouverte au fur et à mesure par des cations de sodium liés, jusqu'à une certaine concentration sodique limite. Au-delà de cette concentration, les ions de sodium commencent à pénétrer entre les couches et un gonflement interne de la structure ou une séparation des paquets sous forme d'unités plus petites peut apparaître, favorisant ainsi la dispersion.

La concentration en sels du fluide d'érosion

La dissolution des sels en forte concentration dans l'eau d'érosion est aussi une cause d'apparition du phénomène osmotique évolutif (Moriwaki et Mitchell, 1977). Cette concentration saline constitue un facteur sensible qui contrôle la dispersion, même à de faibles quantités de sodium dans la structure.

L'explication de cette sensibilité à la dispersion par rapport à la concentration saline de l'eau d'immersion est le contrôle par cette salinité de l'épaisseur de la couche ionique à l'interface particules de sol et liquide environnant. En effet, si la concentration en sel augmente, l'épaisseur de la couche ionique diminue jusqu'à une certaine concentration au-dessus de laquelle les forces attractives sont dominantes et les particules ne peuvent pas se disperser.

En conséquence, si la concentration en sels dans l'eau d'érosion augmente, la dispersion diminue. Mais, si le sol a un taux d'absorption de sodium très élevé, il reste dispersant même pour de fortes concentrations salines.

Le pH du fluide d'érosion

Le pH du fluide d'érosion, relié à sa concentration en ions H^+ , a lui aussi une influence sur la capacité de dispersion du sol. Cette influence est due à l'existence dans la solution, en contact direct avec le sol, d'ions H^+ qui modifient le chargement électrique des feuillets d'argile.

Dans la plupart des minéraux argileux, les couches tétraédriques de silicium SiO_2 sont interconnectées. Trois des quatre atomes d'oxygène de chaque tétraèdre sont partagés pour former un réseau hexagonal. Donc, les bords des feuillets d'argile (zone où se produit la croissance ou la dissolution de l'argile) ont des atomes d'oxygène qui forment de fortes liaisons avec l'ion H^+ afin de minimiser l'énergie du système (dissociation des molécules d'eau au contact de la surface pour former des groupements $M-OH$ avec $M=Si, Al...$). Ainsi, le pH du milieu impose une protonation ou déprotonation des groupements OH plus ou moins grande pour former en surface des groupements $M-OH_2^+$ ou $M-O^-$.

Lorsque le pH est élevé ($pH > 9$), correspondant à une faible concentration en ions H^+ dans la solution, le chargement négatif des feuillets (apparition des groupements $M-O^-$) augmente. En revanche, pour de faibles pH ($pH < 5$), les ions H^+ sont attirés en grand nombre vers la surface des feuillets, produisant une diminution de la charge électrique négative, charge qui peut devenir positive (Van Olphen, 1963). Il est alors possible que des forces d'attraction entre des charges de signes différents apparaissent, ce qui diminue la dispersion de l'argile.

La structure du minéral argileux

L'espèce argileuse la plus dispersive est la montmorillonite compte tenu de la présence, dans la zone interfeuille, de cations compensateurs sodium ou calcium. La liaison entre deux feuillets élémentaires, où se retrouvent face à face deux couches tétraédriques, est très faible, en raison de la présence des atomes d'oxygène. Les molécules polaires d'eau s'associent d'abord avec les cations échangeables, qui s'hydratent. D'autres molécules d'eau seront absorbées à la surface des feuillets d'argile par l'intermédiaire de liaisons hydrogène. Comme ces liaisons sont moins fortes que celles créées par l'intermédiaire des cations, la structure d'argile peut gonfler facilement et sa capacité de dispersion augmente avec l'absorption d'eau.

La structure de l'illite est identique à celle de la montmorillonite, mais la présence d'ion K^+ rééquilibre électriquement les feuillets et renforce les liaisons entre feuillets élémentaires. Ces argiles sont donc moins sensibles à la dispersion.

En revanche, la kaolinite, constituée par la superposition d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique, est peu dispersive. La liaison entre les deux couches qui composent le feuillet élémentaire est très forte (les deux éléments sont pratiquement indissociables). Les liaisons entre les feuillets superposés sont, elles aussi, très fortes grâce aux ions OH^- . Ainsi l'empilement de feuillets est difficilement dissociable, et donc la capacité de dispersion est faible. Pour qu'une kaolinite soit dispersive, il est nécessaire d'avoir des conditions externes propices tels qu'un pH fort ou une faible concentration en sels sodiques dans le liquide environnant. Le Tableau 1.3 liste les facteurs qui favorisent la dispersion du sol

Tableau 1.3 : Facteurs qui favorisent la dispersion du sol

	Facteur favorisant la dispersion
Sol	Présence de cation de sodium
	Le type d'empilement des feuillets pour former des agrégats dans le cas de la montmorillonite
	La présence d'une structure argileuse de type TOT (empilement de couche tétraédrique/octaédrique/ tétraédrique) rencontrée pour les montmorillonites ou les illites
Fluide	Faible concentration en sel
	pH élevé

1.2.4 Synthèse

Les ouvrages en terre des infrastructures linéaires de transport auxquels nous nous intéressons dans ce travail peuvent être sollicités par des événements climatiques exceptionnels générant une élévation du niveau des eaux. Le passage d'une grande crue s'accompagne normalement d'érosions latérales dues au courant affectant en premier lieu les talus des remblais. Nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux conséquences de la mise en charge du remblai voire de la surverse lorsque le niveau des eaux dépasse le remblai, entraînant une rupture progressive causée par un phénomène d'érosion externe ou interne.

L'érosion externe est engendrée par des circulations d'eau, même peu importantes, sur la crête des ouvrages. Ceci arrive lorsque la transparence de l'ouvrage est insuffisante pour évacuer l'eau de l'inondation, provoquant alors une surverse. Lors la surverse au dessus de la couche de la chaussée l'eau coule jusqu'au talus aval où l'écoulement devient torrentiel et possède un grand pouvoir érosif. Les vitesses d'écoulement sont supérieures aux limites d'arrachement. Le mécanisme d'érosion s'amorce à partir du bord aval de la crête et progresse jusqu'à ce qu'une brèche soit ouverte. Le phénomène peut durer quelques minutes à quelques

heures selon la taille des matériaux, leur cohésion, le revêtement de la crête, la hauteur de l'eau qui s'écoule au-dessus de l'ouvrage (Figure 1.22a). L'endommagement du pied de talus ou raidissement de la pente du talus aval, conduit donc à la destruction partielle du remblai ou destruction totale du remblai (formation d'une brèche, soit rectangulaire, triangulaire, circulaire, etc.).

L'érosion interne correspond à l'entraînement des matériaux au sein du corps de l'ouvrage ou de sa fondation. Elle est provoquée par des percolations excessives à travers l'ouvrage. Le conduit de fuite s'agrandit par érosion jusqu'à provoquer l'effondrement de la structure (Figure 1.22b et c).

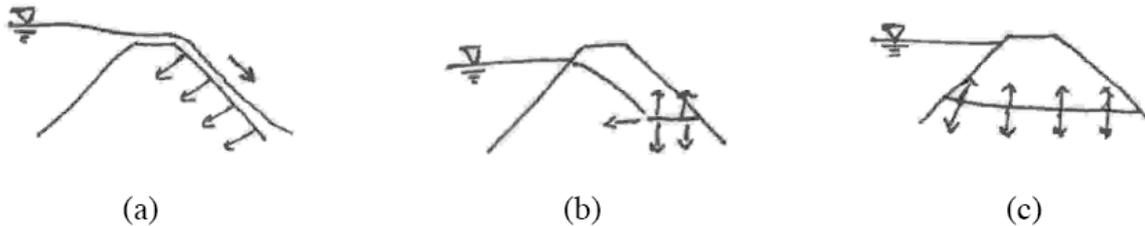


Figure 1.22 : Exemple de situation d'érosion d'ouvrages hydrauliques : a) érosion externe, b) initiation d'érosion interne, c) évolution d'érosion interne

L'érosion des sols ne se développe que si deux conditions sont réunies : l'arrachement des particules et leur transport.

Quelques mécanismes de rupture particuliers sont liés aux hétérogénéités du remblai ou à la présence de défauts ; ils ne constituent pas des typologies simple mais plutôt combinées :

Renard hydraulique et érosion régressive

En cas de gradients hydrauliques élevés dus à une période de crue, une zone d'écoulement préférentielle se développe initiant une érosion régressive. L'érosion régressive provoque la diminution de la longueur de percolation à travers du corps du remblai. L'accroissement de la vitesse de percolation peut occasionner l'élargissement du conduit ou l'érosion du pied du talus, de laquelle découlera la rupture par brèche.

L'érosion d'un remblai avec deux couches de nature différente.

Le risque de suffusion externe peut exister entre deux zones du remblai de nature différente. Ce type d'érosion se développe plus rapidement qu'un phénomène de suffusion interne. La condition de filtre n'est pas satisfaite entre les matériaux fin et grossier en contact. L'eau d'infiltration entraîne les éléments fins du remblai vers les espaces poreux interparticulaires du sol le plus grossier. Du fait de ce transport de fines, se développe la formation de cavités dans le corps du matériau fin, provoquant la décompression du toit de la cavité et peu à peu l'effondrement pour finir par déboucher sur la crête du remblai par un fontis.

L'érosion interne provoquée par la présence de terrier ou d'empreinte racinaire.

La présence de terriers des animaux fouisseurs ou d'empreintes racinaires laissés par des arbres morts joue le même rôle qu'une fissure en augmentant le gradient hydraulique de percolation dans le remblai.

La **dispersion** constitue un mécanisme à part où l'action des forces électrochimiques éloigne les particules les unes des autres dans un fluide. Ce passage d'une substance colloïdale initialement floculée vers la forme dispersée est provoqué sous l'effet d'agents physiques, physicochimiques ou chimiques.

Finalement on notera que l'appréciation du risque encouru par un remblai diffère de celui d'une digue : la ruine d'un digue est considérée comme le point départ d'un risque induit sur les zones vulnérables protégées par l'ouvrage défaillant, tandis que la ruine de la route induit principalement un risque pour ses usagers. Dans la plupart des cas connus, les routes ne sont pas éventrées de part en part par une brèche mais sont seulement partiellement érodés. La ruine d'un remblai entraîne principalement des problèmes de gestion de trafic en cas de crues, en générant une mise hors d'état de fonctionnement ou une mise en danger des usagers imprudents qui tenteraient de l'emprunter pendant l'épisode de la crue.

1.3 CARACTERISATION DE L'EROSION

La volonté de caractériser l'érosion pour maîtriser les cours des voies navigables est une préoccupation ancienne. Dans le folio 9v du Codex Leicester, Léonard de Vinci décrit deux essais à pratiquer dans un récipient en verre qu'il appelle « cuve » (Figure 1.23). Il propose déjà des expériences dirigées du genre : « comment un petit poids proche du fond d'une eau transparente et suspendue à un flotteur par un fil, peut expliquer la diversité des déplacements en dessous de la surface de l'eau » des particules de sol.

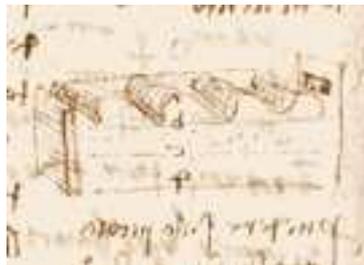


Figure 1.23 : Essai en cuve proposé par Léonard de Vinci (1510)

Depuis cette époque, le développement rapide des infrastructures de transport : canaux, routes, voies ferrées et de production d'énergies hydroélectrique ou de stockage d'eau, et le besoin de les protéger ont nécessité une meilleure maîtrise du risque d'érosion des ouvrages en terre réalisés. Le développement de nouvelles techniques d'essais s'est réalisé en parallèle afin de fournir aux ingénieurs les informations nécessaires à leurs calculs. Nous allons présenter dans ce paragraphe quelques unes de ces différentes techniques d'essais utilisées pour étudier l'érosion externe et interne. Des synthèses bibliographiques détaillées ont été rédigées par Bendahmane (2005) et Tarog (2000) sur l'aspect particulier de l'érosion par suffusion. Nous invitons le lecteur à s'y reporter.

1.3.1 Généralités

Afin d'évaluer la sensibilité à l'érosion du sol soumis à un écoulement, le point crucial dans tous les essais d'érosion est de trouver la relation entre la contrainte de cisaillement τ (la contrainte hydraulique appliquée par l'écoulement sur le sol) et le taux d'érosion \dot{e} (la masse érodée du sol sur une unité de surface pendant une unité de temps) (Figure 1.24).

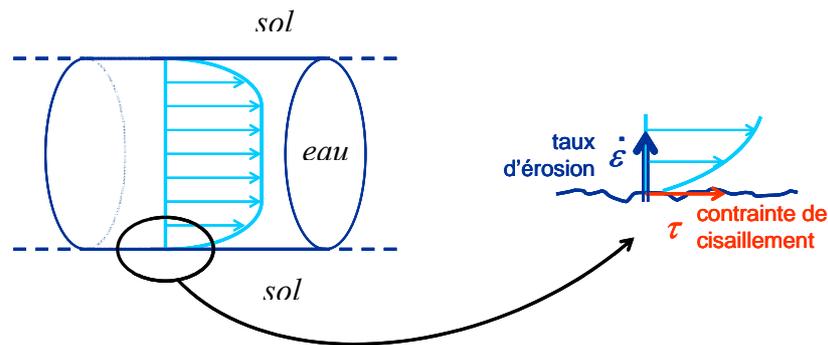


Figure 1.24 : Schéma de l'écoulement dans le sol

Des observations obtenues sur un sol soumis à un écoulement montrent qu'il existe un seuil d'érosion, c'est-à-dire que l'érosion est supposée se produire si la contrainte exercée sur le sol par le fluide dépasse une valeur caractéristique du sol à un certain état de consolidation et de saturation. Au-dessous de cette valeur, le phénomène d'érosion n'apparaît pas. La valeur de seuil de la contrainte s'appelle contrainte de cisaillement critique τ_c . Elle représente la sensibilité à l'érosion du type de sol étudié. Shields (1936) a été le premier à mettre en évidence la loi d'érosion d'un sol qui peut s'exprimer sous la forme :

$$\dot{\varepsilon} = k_{er} \times (\tau - \tau_c)$$

avec k_{er} le coefficient d'érosion.

Cette relation est aussi connue sous le nom de loi de Partheniades (1965) en sédimentologie.

1.3.2 Dispositifs expérimentaux

De nombreux appareils permettant de qualifier ou quantifier le phénomène ont été développés dans le passé. Ces essais réalisables au laboratoire ou in situ peuvent être divisés en deux catégories principales :

- *Catégorie 1 : Essais d'érosion externe (de surface)*
 - Essai d'érosion en canal (« Hydraulic flume test ») (Gibbs, 1962 ; Kandiah et Arulanandan, 1974 ; Arulanandan et Perry, 1983 ; Shaikh *et al.*, 1988a, 1988b ; Briaud *et al.*, 2001),
 - Essai d'érosion par cylindres tournants (« Rotating cylinder test ») (Kandiah et Arulanandan, 1974 ; Arulanandan *et al.*, 1975 ; Arulanandan et Perry, 1983 ; Chapuis 1986a, 1986b ; Chapuis et Gatien, 1986),
 - Essai d'érosion par jet (« Jet Erosion Test ») (Hénensal, 1990 ; Hanson 1991, 1992 ; ASTM D5852-95, 1995),
- *Catégorie 2 : Essais d'érosion interne (selon les auteurs, mais cela est discutable)*
 - Essai d'érosion de trou ou de fente (« Hole Erosion Test ») (Christensen et Das, 1973 ; Sanchez *et al.*, 1983 ; Lefebvre *et al.*, 1985 et 1986 ; Reddi *et al.*, 2000 ; Wan et Fell, 2002, 2004).
 - Essai d'érosion par triaxial (« Triaxial Erosion Test ») (Sanchez *et al.*, 1983 ; Bendahmane, 2005).

Nous allons d'abord présenter les appareillages et les modes opératoires puis nous discuterons les résultats et les méthodes d'analyse proposées.

1.3.2.1 Essai d'érosion en canal (« Hydraulic Flume Test »)

L'essai consiste à faire s'écouler le fluide sur la surface de l'échantillon. Le schéma de l'appareillage est montré dans la Figure 1.25. La force de traction est calculée par la mesure de vitesse d'écoulement. Le taux d'érosion est défini comme la pente de la courbe de masse érodée avec le temps. La masse érodée est la différence entre la masse sèche avant et après l'essai.

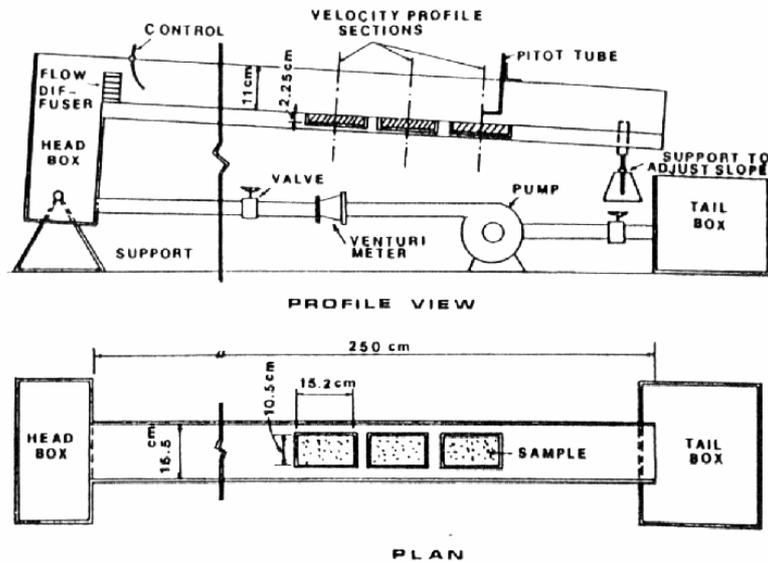


Figure 1.25 : Schéma de l'appareillage de type canal (Shaikh et al, 1988a)

Gibbs (1962) a réalisé des essais avec les échantillons intacts provenant d'un canal, constitué de limon et d'argile de faible plasticité. Il a essayé de mettre en évidence la force de traction exercée sur le sol et de relier la résistance à l'érosion avec la plasticité, la densité, la granulométrie du sol. Il a conclu que la densité n'est pas la caractéristique qui permet de distinguer un sol résistant à l'érosion d'un sol qui ne l'est pas. La granulométrie a par contre une grande influence sur la résistance à l'érosion d'un sol granulaire tandis que la plasticité est la caractéristique principale qui influence la résistance à l'érosion d'un sol fin. Il a proposé une classification des sols selon leur résistance à l'érosion à partir du diagramme de Casagrande. La contrainte de cisaillement critique τ_c déterminée se situe entre les valeurs 0,72-2,87 Pa.

Lyle et Smerdon (1965) ont étudié un sol provenant du Texas (limon, argile) en testant le sol à trois degrés de compactage différents. Ils ont considéré que la contrainte de cisaillement hydraulique est la force de traction qui cause une érosion notable dans le canal. Ils ont conclu que τ_c augmente avec l'indice de plasticité et diminue avec l'indice des vides. L'ordre de τ_c est de 0,96 Pa. Ils ont proposé des corrélations entre τ_c et l'indice de plasticité ainsi que le pourcentage d'argile. L'influence de la teneur en eau et la densité étaient négligées dans leurs analyses.

Kandiah et Arulanandan (1974) ont étudié le limon sableux Yolo. Ils ont comparé les résultats des essais en canal avec ceux du cylindre tournant. Ils ont trouvé que la contrainte de cisaillement critique est similaire dans les 2 tests mais le taux d'érosion est plus faible dans le cas de l'essai en canal. Le mécanisme d'érosion est le gonflement. Ils ont étudié l'influence de la teneur en eau sur τ_c et ont constaté une augmentation de celle-ci avec la teneur en eau.

Les travaux de Arulanandan et Perry (1983) ont porté sur le sol des barrages sur lesquels des problèmes d'érosion sont apparus. Ils ont montré que la classification de Gibbs (1962)

avec le diagramme de Casagrande n'est pas adéquate dans ce cas parce qu'elle n'a pas considéré des facteurs importants qui impactent la résistance à l'érosion comme la minéralogie de l'argile, la composition du fluide érodant et celle de l'eau des pores. Ils ont proposé une classification qui se base sur la contrainte de cisaillement critique : un sol est érodable pour $\tau_c < 0,4$ Pa, un sol est moyennement érodable pour $0,4 < \tau_c < 0,9$ Pa et un sol est résistant à l'érosion pour $\tau_c > 0,9$ Pa.

Shaikh *et al.* (1988a) ont étudié l'influence du pourcentage d'argile et de la teneur en eau sur la sensibilité à l'érosion d'un sol composé de Na-montmorillonite. Ils ont conclu que le taux d'érosion est constant pendant l'essai, la relation entre le taux d'érosion et la contrainte de cisaillement est approximativement linéaire et $\tau_c = 0$. De plus, le taux d'érosion diminue avec le pourcentage d'argile. La densité sèche n'était pas considérée dans leurs travaux. Par la suite, Shaikh *et al.* (1988b) ont étudié le taux d'érosion d'une argile dispersive (Na-montmorillonite) et d'une argile non dispersive (Ca-montmorillonite). Leur étude a porté sur la relation entre le taux d'érosion et la sensibilité à la dispersion. Leurs conclusions sont que le taux d'érosion n'est pas très influencé par la teneur en eau et un sol non-dispersif peut être plus érodable qu'un sol dispersif à l'état non saturé. Cette étude a été poursuivie par Bradford et Blanchard (1999) qui ont mis en la relation directe entre le pourcentage et la nature de l'argile avec le taux d'érosion.

Enfin, Briaud *et al.* (1999, 2001) ont étudié l'influence du lessivage sur un sol cohésif provenant d'échantillons intacts au niveau des piliers d'un pont. Ils ont conclu que plus la contrainte de cisaillement critique de l'échantillon est élevée, plus son taux d'érosion est faible.

1.3.2.2 Essai d'érosion par cylindre tournant (« Rotating Cylinder Test »)

Ce type d'essai a été développé initialement par Moore et Masch (1962). Le dispositif utilisé pour le « Rotating cylinder test » est identique à celui d'un rhéomètre classique. L'essai consiste à mettre en rotation le cylindre extérieur en maintenant fixe, le cylindre intérieur qui contient l'échantillon de sol (Figure 1.26).

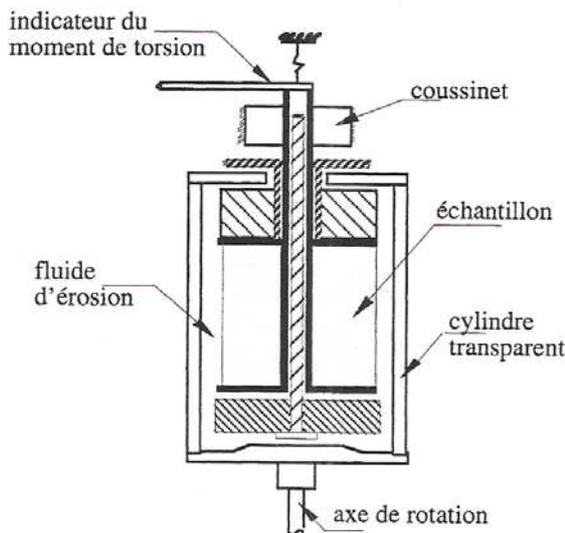


Figure 1.26 : Schéma de l'essai d'érosion par cylindre tournant (Tarog, 2000)

Le fluide est alors entraîné et exerce un moment de torsion sur l'échantillon de sol. La contrainte de cisaillement exercée par le fluide est obtenue en écrivant l'égalité des moments de torsion :

$$\tau = 2\mu \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \omega$$

Où : R_1 , R_2 sont les rayons du cylindre intérieur et extérieur ; ω est la vitesse angulaire imposée au cylindre extérieur ; μ est la viscosité dynamique du fluide.

À l'origine, l'essai d'érosion par cylindre tournant (Kandiah et Arulanandan, 1974 ; Arulanandan *et al.*, 1975 ; Arulanandan *et al.*, 1980 ; Arulanandan et Perry, 1983) a été développé seulement pour les sols reconstitués. Il ne peut pas mesurer précisément la contrainte de cisaillement parce que l'évolution des propriétés du fluide environnant (la viscosité, la turbulence) n'est pas considérée. Le taux d'érosion n'est pas mesuré précisément (on mesure la différence de masse du sol sec avant et après érosion au lieu de mesurer la masse de sol érodé). Plus tard, avec l'amélioration de l'appareillage (Chapuis 1986a, 1986b ; Chapuis et Gatien, 1986), cet essai a permis de réaliser des expériences sur des sols intacts et des sols reconstitués. Il a permis également de mesurer précisément le taux d'érosion.

1.3.2.3 Essai d'érosion par jet d'eau (« Jet Erosion Test »)

La technologie de découpe par jet d'eau des sols remonte aux années 60 avec les recherches des compagnies mettant en place les câbles transocéaniques. Celles-ci souhaitaient découper efficacement les sols pour enfouir les câbles à l'abri des chaluts. Afin de développer cette technologie, de nombreuses études ont été réalisées pour exploiter au mieux le pouvoir d'érosion de l'eau pour créer la tranchée recevant le câble (Atmatzidis et Ferrin, 1983 ; Dabbagh *et al.*, 2002 ; Machin, 2000 ; Mellor, 1972 ; Rockwell, 1981 ; Sundaram et Liu, 1978)

Des recherches plus spécifiquement dédiées à l'érosion ont démarrées dans les années 80 et des essais d'érosion au moyen de jet ont été mis au point pour étudier le phénomène d'érosion de surface du sol. Dans ces essais, la surface du sol est attaquée par des jets d'eau perpendiculairement à la surface. Lors d'essais de ce type, Moore et Masch (1962) ont mesuré la résistance à l'érosion du sol en mesurant la perte de masse du sol toutes les 10 minutes et en estimant la moyenne de la profondeur de lessivage. Ils ont trouvé que la profondeur de lessivage varie en fonction de quelques paramètres tels que la distance entre le jet et le sol, le diamètre du jet, la vitesse de l'injection, le temps. Ils ont remarqué que ce type d'appareillage est approprié pour mesurer la résistance relative au lessivage cependant il n'est pas raisonnable de l'utiliser pour mesurer la contrainte de cisaillement à la surface du sol.

L'érodimètre à jet mobile LCPC est issu d'un schéma daté de 1983 (Hénensal, 1983). L'objectif était de disposer d'un appareil d'étude de l'érosion hydrique essayant de faire intervenir à la fois l'impact des gouttes de pluie et le transport par ruissellement. Une première version de l'appareil a été fabriquée en 1984 et testée en 1985. De forme rectangulaire (5,2x10x27 cm), il comportait 7 gicleurs démontables disposés régulièrement et un réservoir (Figure 1.27).

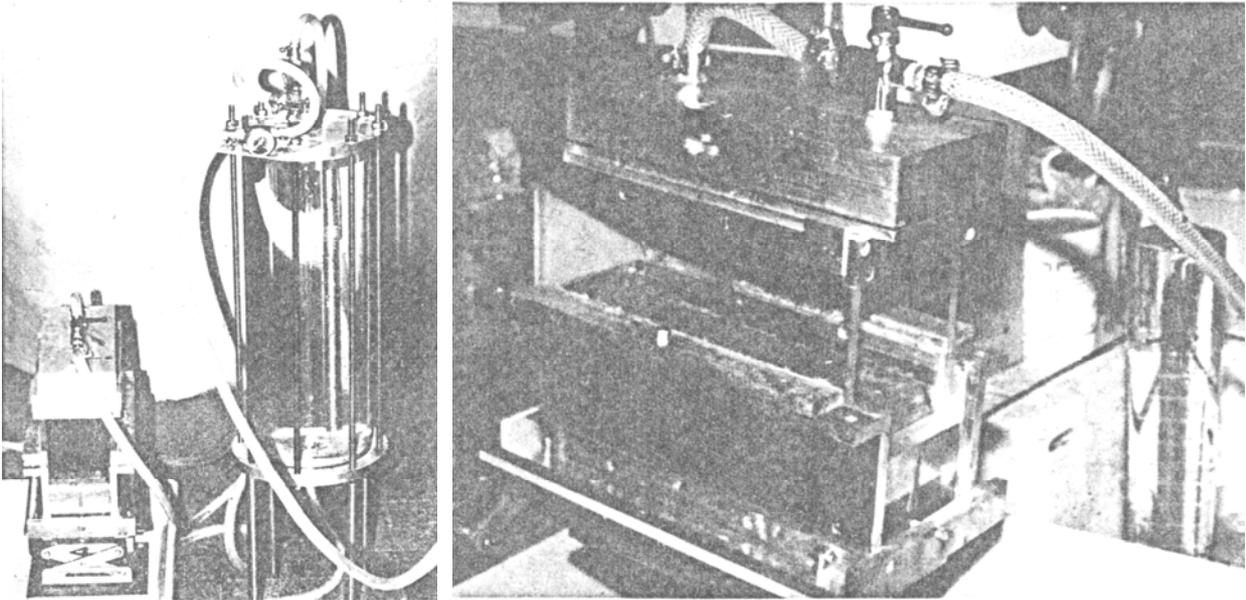


Figure 1.27 : Erodimètre à jets fixes LCPC (Hénensal et al., 1985)

Toutefois l'appareil étant statique, Hénensal constate que l'érosion se fait principalement en profondeur et non superficiellement et que si le déplacement longitudinal de l'érodeur à la main est possible, il est dépendant de l'opérateur. Un nouveau prototype est alors envisagé avec un mouvement circulaire continu permettant :

- d'utiliser un moule Proctor modifié traditionnel,
- de réaliser plus facilement les éprouvettes,
- d'exécuter l'essai automatiquement.

Ce nouveau prototype réalisé en 1986 comportait trois éléments (Figure 1.28) :

- un mécanisme entraîné par un moteur et commandant un bras arroseur tournant à environ 4 tours par minutes,
- une chambre de pluie,
- un moule porte éprouvette ou in situ une trousse coupante pour pénétrer légèrement dans le sol.

Il se différencie donc par la mise en rotation de la partie mécanique active projetant, à partir de gicleurs, six jets d'eau identiques. D'où son nom d'érodimètre à jets mobiles. L'ensemble est complété par une source de pression et une batterie actionnant l'appareil et loge dans une boîte de transport pour aller sur site.

La sensibilité à l'érosion est mesurée à partir de la masse érodée de sol sous la pression constante de 1 bar lors de l'injection d'eau pendant une minute. Hénensal a proposé une classification de la sensibilité à l'érosion pour les matériaux à partir de la masse sèche érodée.

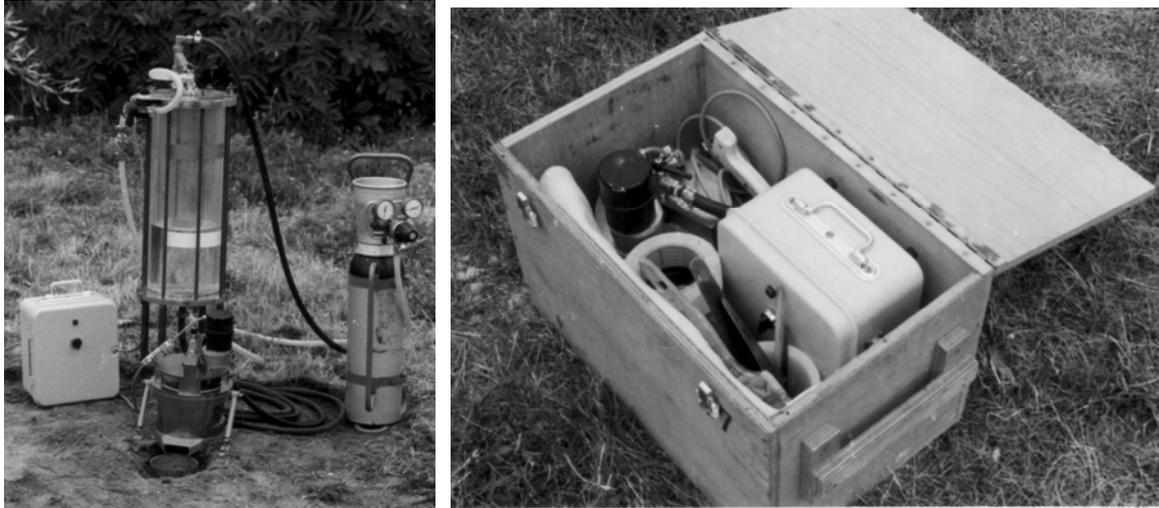


Figure 1.28 : Erodimètre à jet mobile LCPC (Hénensal et al., 1987)

Les travaux de Hénensal et Duchatel (1990) ont porté sur la sensibilité à l'érosion de différents types du sol. Il a étudié l'influence de la pente, du compactage, du produit de traitement sur la résistance à l'érosion. Ces travaux avait pour objectif de corréliser la sensibilité à l'érosion externe du sol à des paramètres mesurables en laboratoire tels que la valeur au bleu méthylène, l'activité, la texture et la pente (Hénensal et Duchatel, 1990 ; Hénensal, 1993) (Figure 1.29).

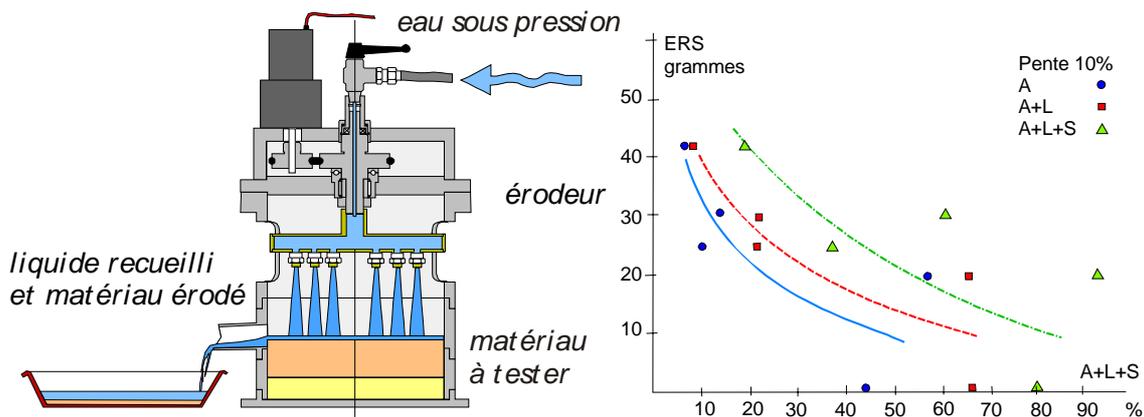


Figure 1.29 : Schéma de l'essai d'érosion par érodimètre LCPC (Henensal et al., 1987) et variation de l'érodabilité en fonction de la texture (Hénensal et Rampon, 1994)

Un érodimètre à jet central fixe a été développé en 1985 par le service de Fort Worth du ministère de l'agriculture des États-unis d'Amérique (USDA) (REMR, 1985). Le protocole expérimental consiste à envoyer un jet sous une pression de 140 kPa et de mesurer le volume de sol érodé toute les 5 minutes et ce pendant 30 minutes. Ensuite les courbes volume érodé en fonction du temps sont tracées.

En 1990, Hanson de l'Agricultural Research Service du même ministère a proposé un appareillage au principe identique mais disposant d'une chambre fermée, l'a breveté en 1993 et fait normaliser en 1995 (Hanson, 1992 ; 1993 ; ASTM D5852-95, Hanson et Cook, 2004). Le schéma de l'appareillage est montré dans la Figure 1.30. La géométrie de l'appareil de l'ARS est assez similaire à celui du LCPC. La chambre dans laquelle se passe le phénomène d'érosion est submergée par l'eau à contrario de celui du LCPC où l'évacuation est au niveau de la partie plane de l'éprouvette (Hénensal et Duchatel, 1990).

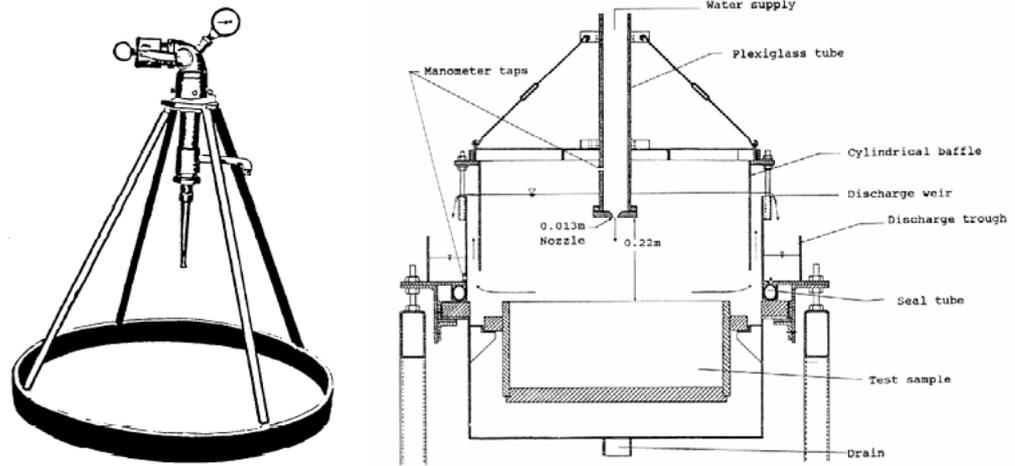


Figure 1.30 : Schéma de l'essai d'érosion par érodimètre USDA (REMR, 1985) et ARS (Hanson, 1992)

Hanson (1991, 1992) a étudié le lessivage d'un sol cohésif et non cohésif. Il a constaté que le pic de la contrainte τ_{om} (Pa) le long de la frontière du sol immergé est uniquement fonction de la vitesse du jet U_o (cm / s) à la buse :

$$\tau_{om} = 0,0014 U_o^{1.5}$$

La profondeur maximale du lessivage D_s est déterminée. Il a trouvé la relation suivante entre D_s/t et U_o :

$$\frac{D_s}{t} = J_i U_o \left(\frac{t}{t_1} \right)^{-0.931}$$

Avec : J_i : le coefficient, l'« Indice de jet »
 t_1 : le temps de référence égal à 1 s.

L'indice de jet est relié au coefficient d'érosion par la formule : $k_{er} = 0.003e^{385J_i}$. Cette équation indique que plus J_i est élevé, plus k_{er} est élevé et moins le sol est résistant à l'érosion. Hanson a conclu que l'« indice de jet » J_i peut être utilisé pour exprimer la résistance à l'érosion du sol dans les conditions de l'expérience.

Hanson et Robinson (1993) ont comparé la résistance à l'érosion d'un même sol ayant subi différents modes de compactage ou présentant des densités sèches ou des teneurs en eau différentes. A une teneur en eau donnée, la résistance à l'érosion du sol croît avec l'augmentation de la densité sèche. A une densité sèche donnée, la résistance à l'érosion du sol croît avec l'augmentation de la teneur en eau. Et à une teneur en eau et densité sèche donnée, la résistance à l'érosion du sol ne diffère pas selon le mode de compactage dynamique ou statique appliqué.

1.3.2.4 Simulateurs de pluie et de ruissellement

L'essai avec simulateur de pluie est plus spécifiquement adapté à l'étude de l'érosion pluviale (Warloulzel, 1999). Les planches réalisées en laboratoire permettent plus rapidement de réaliser des simulations de pluie ou ruissellement en conditions contrôlées. La planche dépasse rarement une surface de 1m², toutefois une longueur plus grande permet d'observer

un écoulement hypodermique mieux établi. Le simulateur de pluie sera placé plusieurs mètres au-dessus de la planche. Ce simulateur doit fournir une pluie constituée de gouttes (Figure 1.31).

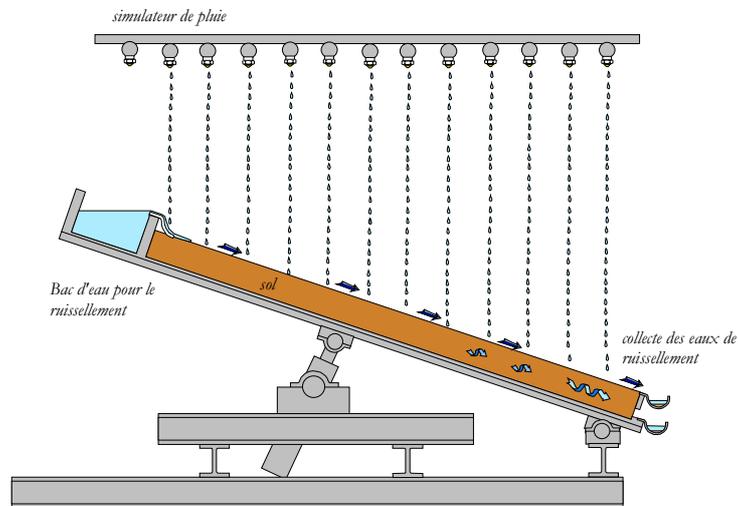


Figure 1.31 : simulateur de pluie (Warlouzel, 1999)

Le laboratoire permet plus facilement d'appliquer des critères d'acceptation qualitatifs. Il est plus facile de recueillir les eaux de ruissellement dans un réceptacle totalisateur et de mesurer le volume solide érodé. Les mêmes mesures qu'in situ sont effectuées à l'aide de débitmètres et de fûts :

- pluviométrie,
- ruissellement,
- matière solide érodée.

Toutefois, ces essais sont critiquables sur plusieurs points : la distribution temporelle variable est remplacée par une pluie constante, la pluie reconstituée est monogranulaire alors que la pluie est naturellement étalée.

1.3.2.5 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 1.32 montre un schéma d'appareillage de Hole Erosion Test (HET) développé par Wan et Fell (2002).

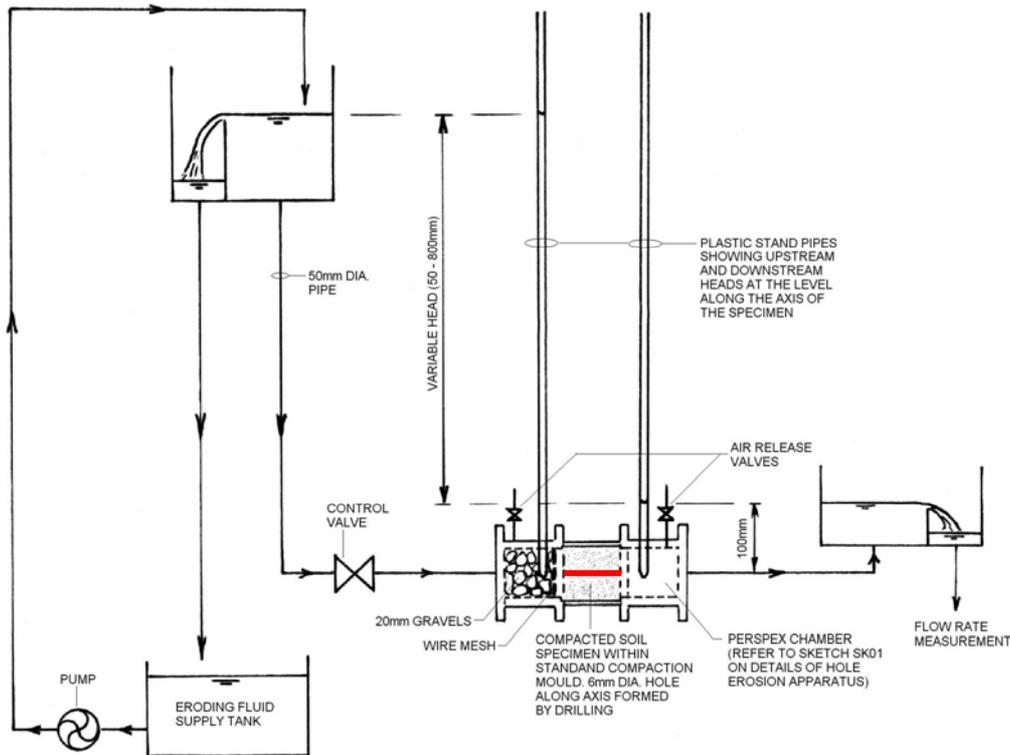


Figure 1.32 : Schéma d'appareillage de Hole Erosion Test (Wan et Fell, 2002)

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.

Lefebvre *et al.* (1985) ont travaillé sur l'argile intacte. Ils ont étudié l'influence de la structure naturelle de l'argile intacte sur le taux d'érosion. Leur conclusion est que l'échantillon d'argile intacte résiste à l'érosion beaucoup mieux que celui d'argile reconstituée.

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 classer 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.

1.3.2.6 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 1.33). 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 de type limon plus importante que sur un sol de type argileux. L'augmentation de la concentration en ions dans le fluide diminue le taux d'érosion d'un sol limoneux plus significativement que dans le cas d'un sol argileux.

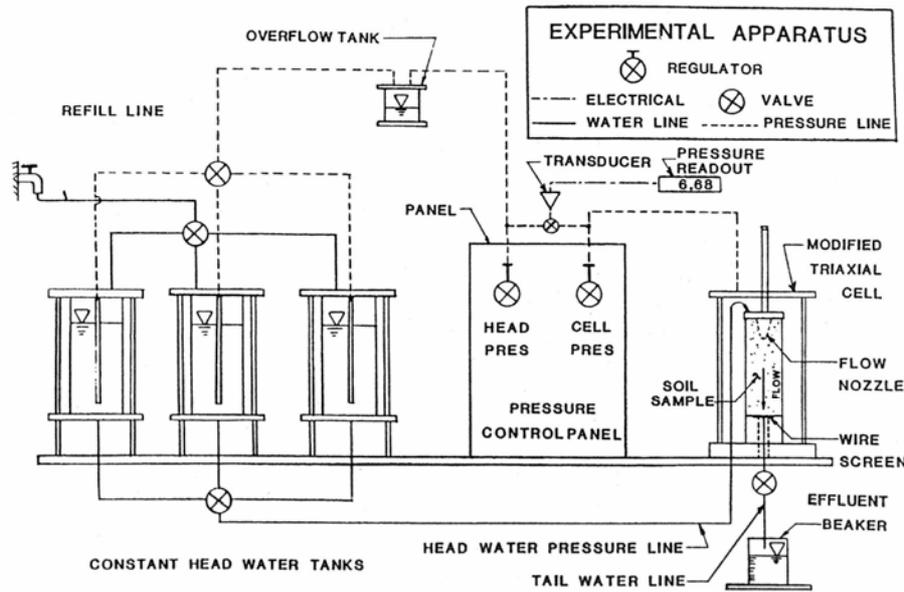


Figure 1.33 : Schéma d'appareillage de Triaxial Erosion Test (Sanchez et al., 1983)

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 amplifie le phénomène de renard (Marot *et al.*, 2007).

1.3.3 Corrélation de l'érosion avec les propriétés du sol

Les différents développements expérimentaux présentés précédemment de manière non exhaustive ont été menés afin de déterminer une relation entre l'érosion et les propriétés du sol. Nous présentons ci-dessous quelques exemples de résultats observés par les travaux expérimentaux cités précédemment mettant en évidence la relation entre les paramètres tels que la taille des particules, les limites d'Atterberg, le pourcentage d'argile avec la contrainte de cisaillement.

Vitesse d'écoulement

Dans le but de quantifier le phénomène d'érosion, Hjulström (1935) a proposé un diagramme entre vitesse d'écoulement et taille des particules (Figure 1.34). Lorsqu'il y a un écoulement, ce dernier exerce sur les grains de surface du sol une action cisailante. Cette force de cisaillement est plus grande quand la vitesse du courant est importante. Le sol quant à lui offre une résistance au détachement de ses grains superficiels qui peut être assimilée à une sorte de résistance au cisaillement.

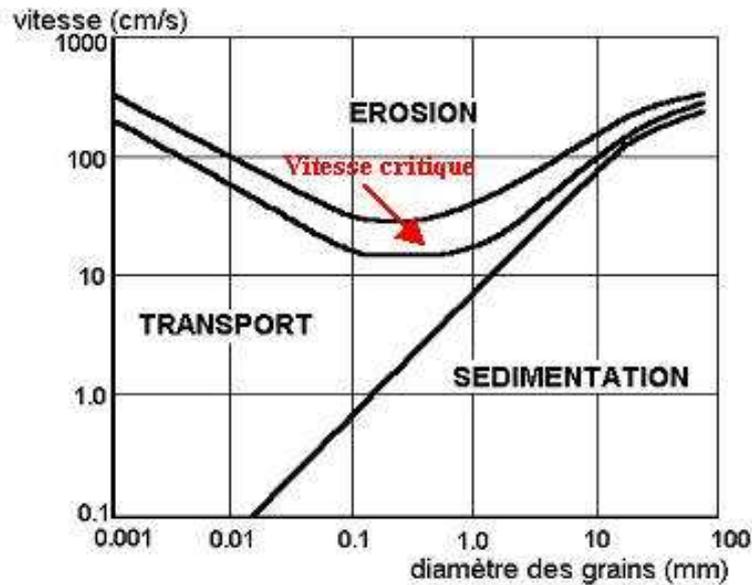


Figure 1.34 : Diagramme montrant la vitesse critique d'érosion (d'après Hjulström, 1935, cité par Hénensal, 1986)

Hjulström a montré que la vitesse à partir de laquelle les grains du fond d'un canal étaient enlevés par l'écoulement dépendait de la dimension de ces grains. Cette vitesse est appelée la vitesse « critique » qui déclenche l'érosion. Cette vitesse est relativement élevée pour les très faibles dimensions de grains (par exemple plus de 1 m/s pour des grains de 5 μm) car la cohésion entre grains est alors très forte. Au fur et à mesure que la dimension des grains s'accroît, la vitesse critique décroît. Mais à partir d'une vitesse minimum qui s'obtient pour une dimension de grain d'environ 0,2 mm, plus la dimension des grains augmente, plus la vitesse critique nécessaire à son arrachage augmente. Une fois l'arrachement effectué, le grain peut être transporté même avec des vitesses d'écoulement inférieures, à condition toutefois que ces vitesses ne deviennent pas inférieures à la vitesse limite entraînant la chute des grains (sédimentation) qui est une fonction croissante de la dimension des grains.

Taille des particules

Shields (1936) a proposé une relation entre la contrainte de cisaillement critique τ_c avec le diamètre moyen des grains D_{50} (diamètre de tamis où les grains passent 50% en masse) :

$$\tau_c (N/m^2) = D_{50} (mm)$$

Smerdon et Beasley (1961) (cité par Clark et Wynn, 2007) a proposé une autre formule entre ces deux grandeurs :

$$\tau_c = 3,54 \times 10^{-28 \times D_{50}}$$

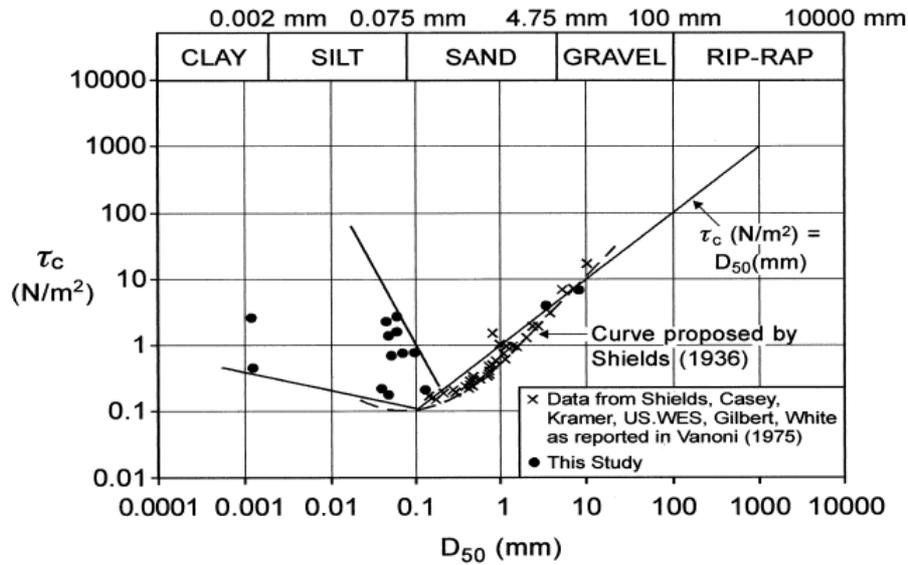


Figure 1.35 : Diagramme de Shields (1936) complété par Briaud *et al.* (2001)

Plus tard, Briaud *et al.* (2001) ont montré que le D_{50} n'est pas un bon paramètre pour prédire la contrainte critique (Figure 1.35). La formule de Shields n'est pas appropriée aux matériaux fins (argile ou limon) parce qu'elle ne tient pas compte de la force électromagnétique et électrostatique entre les particules fines. Ces forces n'existant pas pour le sable ou étant très faibles, le diagramme reste approprié pour le sable.

Limites d'Atterberg

Gibbs (1962) a proposé l'identification de la sensibilité à l'érosion du sol par les limites d'Atterberg. Il a récolté des informations sur 45 exemples de sols constituant les berges de canaux. Il a recueilli des échantillons intacts afin d'effectuer des essais d'érosion en canal en laboratoire. Les échantillons de sol ont été caractérisés comme étant des limons ou des argiles, la plupart présente une faible plasticité. Les résultats des essais d'érosion ont donc été corrélés avec la plasticité. Selon lui, plus la limite de liquidité et l'indice de plasticité sont élevés, plus le sol est résistant à l'érosion (Figure 1.36).

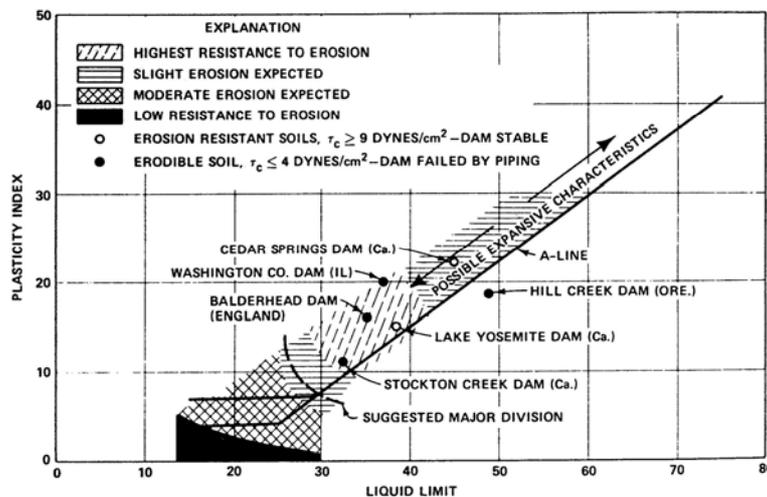


Figure 1.36 : Sensibilité à l'érosion du sol mesurée à partir de la contrainte de cisaillement et de la plasticité (Arulanandan et Perry, 1983)

Cependant, Arulanandan et Perry (1983) ont montré que cette classification n'est pas adéquate. En effet, ils ont placé sur le diagramme des sols constitutifs de barrages présentant des problèmes d'érosion et ont trouvé que ces sols sont toujours classés parmi les sols à forte résistance à l'érosion (Figure 1.36).

Smerdon et Beasley (1961) (cités par Chapuis, 1986b) ont proposé une relation entre la contrainte de cisaillement critique et l'indice de plasticité (I_p) :

$$\tau_c = 0,16 \times I_p^{0,84}$$

Mais les travaux de Briaud *et al.* (2001), Wan et Fell (2002) ont montré qu'il n'y a pas de corrélation pertinente entre la contrainte de cisaillement critique et l'indice de plasticité (Figure 1.37).

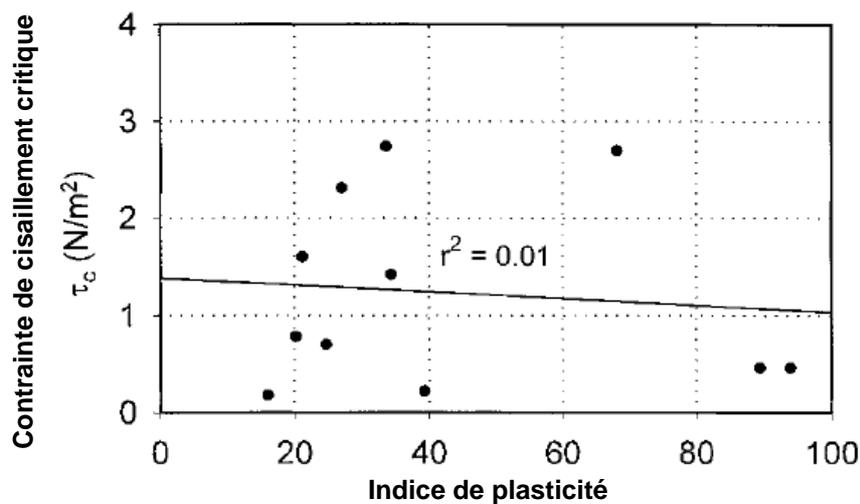


Figure 1.37 : Corrélation entre la contrainte de cisaillement et l'indice de plasticité (Briaud *et al.*, 2001)

Pourcentage d'argile

Concernant la relation entre la contrainte de cisaillement critique et le pourcentage des argiles dans le sol, les travaux de Dunn (1959), Smerdon et Beasley (1961), Lyle et Smerdon (1965) apportent des indications cependant ces travaux ne sont pas en accord concernant la relation entre ces deux paramètres (Figure 1.38).

Smerdon et Beasley (1961) (cité par Clark et Wynn, 2007) a proposé une relation entre la contrainte de cisaillement critique et le pourcentage d'argile (P_c) :

$$\tau_c = 0,493 \times 10^{0,0182 \times P_c}$$

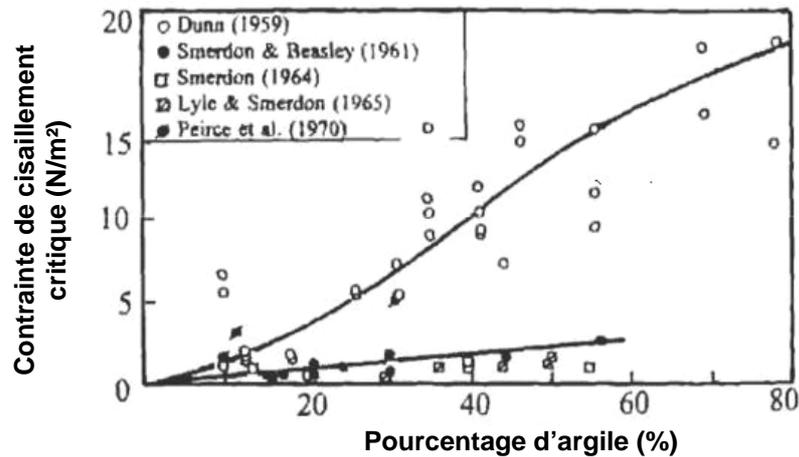


Figure 1.38 : Corrélation entre la contrainte de cisaillement et le pourcentage d'argile (Lyle et Smerdon, 1965)

Julian et Torres (2006) ont estimé quant à eux la contrainte de cisaillement critique en fonction du pourcentage d'argile et de limon (SC) grâce à la formule suivante :

$$\tau_c = 0,1 + 0,1779 \times (SC) + 0,0028 \times (SC)^2 - 2,34 \times 10^{-5} \times (SC)^3$$

Résistance de cisaillement du sol

Quelques auteurs ont essayé de trouver une relation entre la contrainte de cisaillement critique et la cohésion comme Dunn (1959), Lyle et Smerdon (1965), Léonard et Richard (2004) (Figure 1.39).

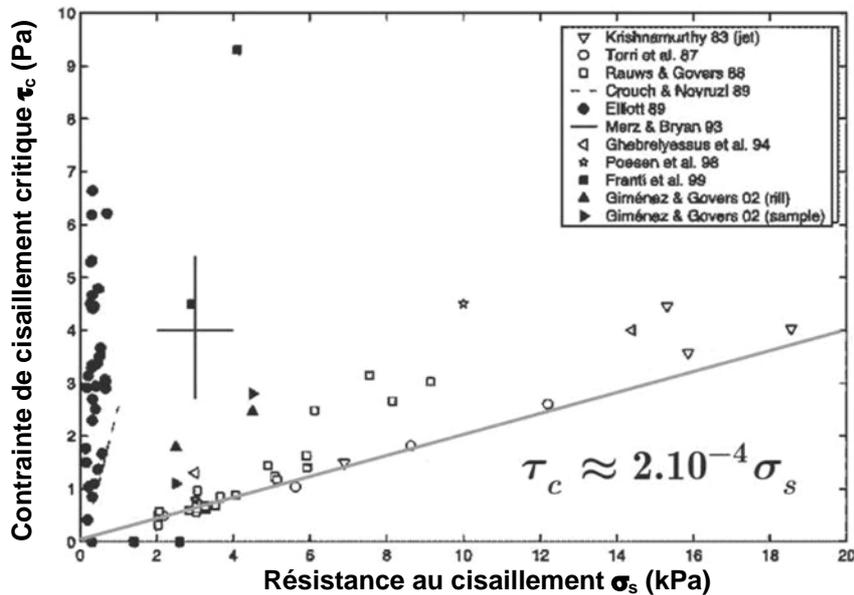


Figure 1.39 : Corrélation entre la contrainte de cisaillement et le pourcentage d'argile (Léonard et Richard, 2004 d'après Bonelli., 2005)

La cohésion étant déterminée par la résistance au cisaillement du sol, elle donne une valeur toujours beaucoup plus élevée de contrainte critique. Cette différence, parfois très grande, a sans doute des causes diverses (dont les méthodes de mesure). Parmi elles, on peut citer par exemple les différences d'environnement des grains. A l'intérieur de la masse de sol, les grains sont entourés par d'autres grains et leur décompactage ne peut pas se produire aussi

facilement que dans le cas de grains situés en surface d'une fissure. Ainsi, la résistance au cisaillement est beaucoup plus élevée. En revanche, à la surface d'une fissure, les grains au contact de l'écoulement subissent une influence plus faible compte tenu d'un nombre moins élevé de grains, le sol apparaît donc moins résistant au cisaillement (ce qui traduit une érodabilité plus grande).

Même si la recherche de corrélation de la contrainte de cisaillement critique avec certaines caractéristiques du sol a abouti à des résultats encourageants, il reste encore beaucoup d'autres facteurs qui peuvent affecter l'érosion tels que la structure, la texture, les propriétés chimiques du sol et également la nature du fluide érodant. Les équations empiriques peuvent n'être applicables que pour certains types de sol seulement. C'est pourquoi, il est recommandé de mesurer directement la contrainte de cisaillement critique par des essais en laboratoire ou in situ (Chapuis, 1986a ; Clark et Wynn, 2007).

Résistance à la découpe au jet

Atmatzidis et Ferrin (1983) ont étudié l'influence de la texture du sol sur la résistance à la découpe au jet et relation entre la profondeur découpée et la vitesse de déplacement du jet. Une pression de 55160 kPa et une buse de 1 mm ont été utilisés pour réaliser 66 essais de découpe sur quatre sols : sable propre (sol 1), sable limoneux (sol 2), limon (sol 3) et argile (sol 4).

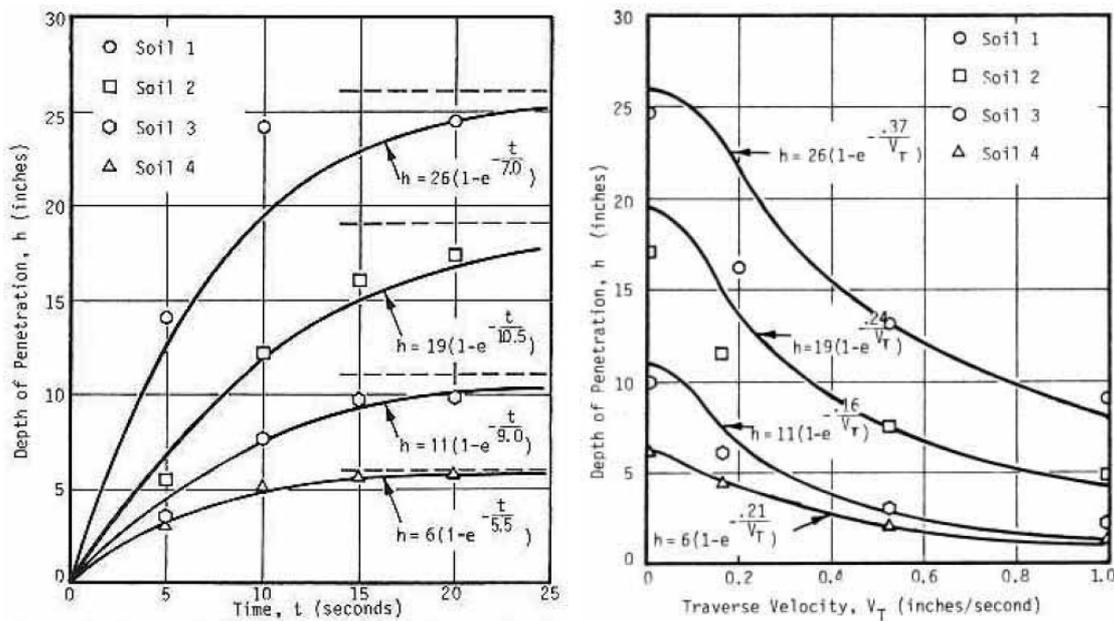


Figure 1.40 : (a) relation entre la profondeur découpée et le temps (b) et relation entre la profondeur découpée et la vitesse de déplacement du jet.

Ils ont observé une bonne cohérence des résultats avec un modèle exponentiel en fonction du temps et aussi de la vitesse de déplacement du jet. La profondeur de pénétration varie linéairement avec la perméabilité du sol avec comme paramètres d'influence le degré de saturation et la densité sèche du sol. De plus le volume de sol touché par l'action du jet croît avec la taille des grains du sol.

1.3.4 Quantification de l'érosion par des mesures directes

La contrainte de cisaillement critique peut être évaluée par une méthode visuelle ou graphique. Dans la méthode visuelle, τ_c est déterminée en mesurant la contrainte de

cisaillement lors de la « défaillance » du sol. Mais le point de « défaillance » est difficile à définir, il dépend de chaque auteur. Selon Kamphuis *et al.* (1983, 1990), la valeur critique τ_c est atteinte quand « des piqûres à la surface du sol » apparaissent. Dunn (1959) détermine τ_c lorsque « l'eau devient trouble » tandis que Smerdon et Beasley (1961) définit τ_c quand « le mouvement général du sol érodé est observé ».

Afin d'éviter les inconvénients liés à toute méthode visuelle, la méthode graphique utilise l'intersection de pente sur un graphique érosion/contrainte (Figure 1.41). Ce point d'intersection représente la contrainte de cisaillement critique (Hanson et Cook, 1997 ; Bradford et Blanchar, 1999 ; Wan et Fell, 2002, 2004). L'équation empirique d'érosion est établie sous la forme :

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} 0 & \text{si } \tau \leq \tau_c \\ k_{er} \times (\tau - \tau_c) & \text{si } \tau > \tau_c \end{cases}$$

avec

$\dot{\varepsilon}$: taux d'érosion ou bien débit de perte de masse par unité de surface (kg/s/m^2)

τ : contrainte de cisaillement du fluide sur le sol (Pa)

τ_c : contrainte de cisaillement critique (Pa)

k_{er} : coefficient d'érosion ($\text{kg/s/m}^2/\text{Pa}$)

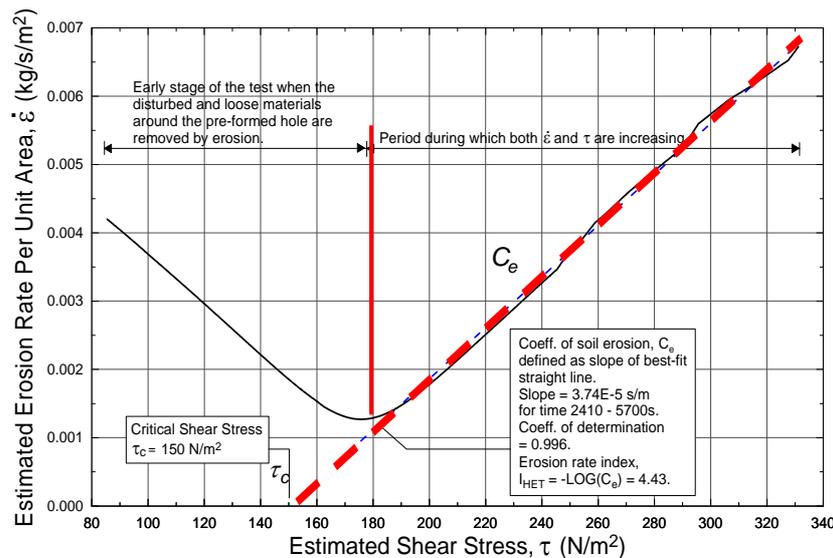


Figure 1.41 : Détermination de la contrainte de cisaillement critique à partir des résultats d'un essai HET (Wan et Fell, 2002)

1.3.5 Interprétation des résultats

Dans la méthode graphique, la façon de déterminer la contrainte de cisaillement critique est un peu différente d'un auteur à l'autre.

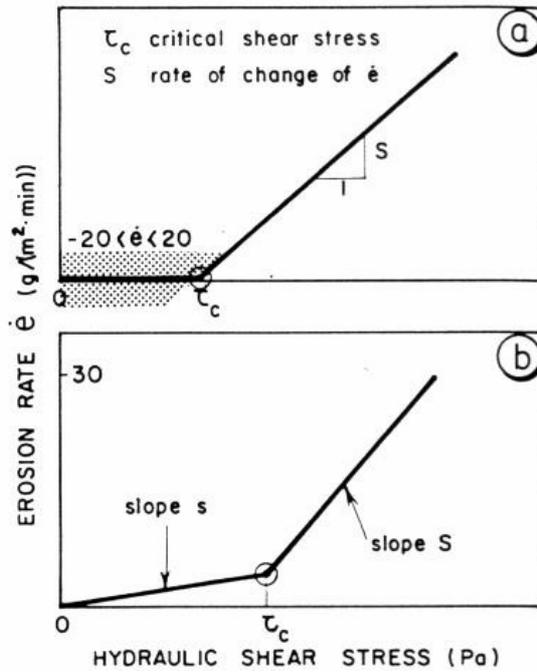


Figure 1.42 : Résultats typiques du taux d'érosion et de la contrainte de cisaillement critique (Chapuis, 1986a), a) ancienne méthode, b) méthode de Chapuis

Chapuis (1986a, b) a proposé une relation bilinéaire pour déterminer la variation du taux d'érosion. Il a défini la contrainte de cisaillement comme le point où le taux d'érosion augmente considérablement au lieu de point où apparaît le taux d'érosion (Figure 1.42).

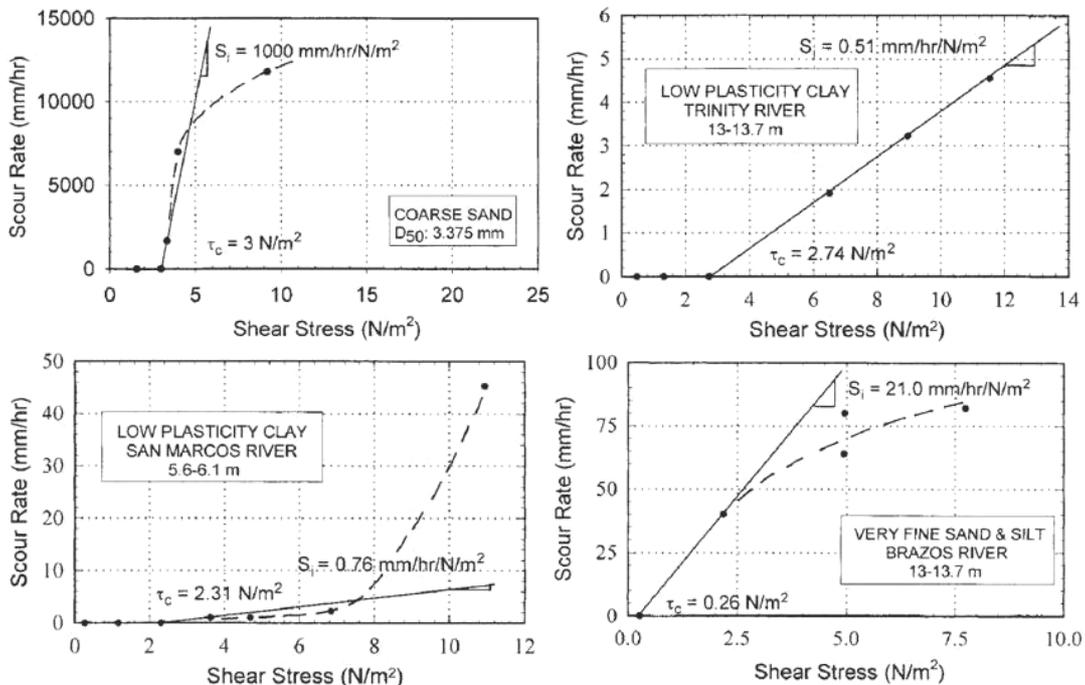


Figure 1.43 : Méthode de détermination de la contrainte de cisaillement critique (Briaud et al, 2001)

Briaud *et al.* (2001) considèrent également la linéarité de la variation du taux d'érosion, cependant ils utilisent la pente initiale pour déterminer la contrainte de cisaillement critique (Figure 1.43).

1.3.6 Limite de l'approche actuelle

Parmi les paramètres influençant le phénomène d'érosion, la contrainte de cisaillement critique et le taux d'érosion semblent être les meilleurs paramètres pour caractériser la sensibilité à l'érosion du sol. Cependant, la façon de mesurer, ou bien de calculer, ces deux paramètres est assez arbitraire avec des valeurs qui dépendent de la méthode d'essai et de l'interprétation des opérateurs. Plus récemment, un des essais qui connaît le plus grand développement est l'essai d'érosion de trou (hole erosion test). Cet essai a permis d'avancer considérablement dans notre domaine d'étude, notamment avec les travaux de Wan et Fell (2002, 2004) qui ont réalisé un grand nombre d'essais. Cependant, certaines hypothèses prises en compte dans ces travaux ne sont pas satisfaisantes.

Afin de calculer le taux d'érosion $\dot{\varepsilon}$ et la contrainte de cisaillement critique τ , il faut connaître le diamètre ϕ du trou à chaque instant t pendant l'essai.

$$\tau = \frac{\phi}{4} \times \frac{\Delta P}{L} \quad (2.1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \rho_s \times \frac{d\phi}{2 \times dt} \quad (2.2)$$

avec : ΔP : différence de pression entre l'amont et l'aval de l'échantillon,

L : longueur de l'échantillon, ρ_s : densité sèche du sol,

La première équation est établie en considérant l'équilibre des forces le long du trou sur le fluide, d'une part en reliant la contrainte de cisaillement aux caractéristiques géométriques du trou et à la différence de pression ($\tau \times L \times P_t = \Delta P \times S$ avec P_t : périmètre mouillé et S : section).

La seconde relation est basée sur la détermination d'une relation entre le taux d'érosion par unité de surface $\dot{\varepsilon}$ et le diamètre du trou à partir d'un bilan de masse solide entre t et $t+dt$.

Les paramètres tels que ΔP , L ou ρ_s sont connus à partir des mesures enregistrées. Le paramètre restant, le plus difficile à déterminer, pour calculer la contrainte de cisaillement τ et le taux d'érosion $\dot{\varepsilon}$ est le diamètre $\phi(t)$ du trou au cours de l'essai.

Détermination de la loi d'évolution du diamètre

La vitesse moyenne v est reliée directement au débit Q par la relation :

$$v = \frac{4Q}{\pi\phi^2} \quad (2.3)$$

Il convient ensuite de déterminer la nature du régime d'écoulement : laminaire ou turbulent. Pour cela il faut calculer le nombre de Reynolds Re :

$$Re = \frac{\rho v \phi}{\eta} \quad (2.4)$$

où η est la viscosité dynamique du fluide.

A partir de là, l'écoulement est caractérisé par des facteurs « de friction » qui ont des définitions différentes selon le type d'écoulement.

Pour un régime laminaire, et de manière exacte dans le cas d'un écoulement de conduite, il est supposé une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement et la vitesse :

$$\tau = f_L v \quad \text{où} \quad f_L = \text{facteur de friction} = \frac{\tau}{v} = \frac{\pi \rho g s}{16} \frac{\phi^3}{Q} \quad (2.5)$$

avec s le gradient hydraulique ($\Delta P/L = \rho g s$) et finalement :

$$\phi = \left(\frac{16 Q f_L}{\pi \rho g s} \right)^{1/3} \quad (2.6)$$

Notons, qu'une étude simple de l'écoulement (profil de Poiseuille) permettrait par ailleurs de trouver l'expression exacte de f_L (relation non utilisée dans les travaux de Wan et Fell):

$$f_L = \frac{32 \eta}{\phi^2} \quad (2.7)$$

Pour un régime turbulent, dans le cadre des travaux de Wan et Fell, la contrainte de cisaillement est supposée proportionnelle au carré de la vitesse :

$$\tau = f_T v^2 \quad \text{avec} \quad f_T = \frac{\rho g \pi^2 s}{64} \frac{\phi^5}{Q^2} \quad (2.8)$$

et finalement :

$$\phi = \left(\frac{64 Q^2 f_T}{\pi^2 \rho g s} \right)^{1/5} \quad (2.9)$$

Notons qu'en toute rigueur, il est seulement possible d'écrire que f_T dépend du nombre de Reynolds Re et de la rugosité relative de la conduite. Il conviendrait ensuite de se référer à des abaques (tels ceux de Moody ou de Nikuradse) concernant le calcul des pertes de charges, pour estimer la valeur de f_T mais cela sort de l'interprétation conduite par Wan et Fell.

Wan et Fell situent la limite entre le régime turbulent et laminaire pour un nombre de Reynolds égal à **5000**.

Le débit Q et le gradient hydraulique s sont mesurés à chaque instant. Par ailleurs, le diamètre initial (percé) et le diamètre moyen final (moulage de cire) sont également connus.

Le régime d'écoulement pouvant varier, le diamètre et la rugosité relative variant, les facteurs « de friction » varient donc également en cours d'essais. Seuls peuvent être estimés les facteurs « de friction » initiaux et finaux à partir de la mesure des diamètres, des débits et des gradients hydrauliques initiaux et finaux puis des équations 2.5 et 2.8.

Les facteurs $f_{L,T}(t)$, inconnus à chaque instant t , sont estimés en laminaire et en turbulent (équations 2.5 et 2.8) en utilisant une approximation linéaire. Pour un essai d'une durée T , le facteur de friction $f_{L,T}(t)$ en laminaire ou en turbulent à l'instant t est :

$$f_{L,T}(t) = \frac{t}{T} (f_{L,T}(T) - f_{L,T}(0)) + f_{L,T}(0) \quad (2.10)$$

Le diamètre du trou ϕ est calculé en laminaire et en turbulent à partir des équations 2.6 et 2.9. Pour savoir quel diamètre retenir, Wan et Fell déterminent ensuite la nature de l'écoulement. Pour cela, ils calculent deux nombres de Reynolds : un avec la valeur du diamètre obtenue en régime laminaire Re_L , l'autre avec la valeur de diamètre obtenue en régime turbulent Re_T .

Après avoir calculé ces deux nombres de Reynolds, ils les comparent à la valeur critique 5000 de la manière suivante :

- Si $Re_L < 5000$ alors le régime est laminaire et $\phi = \phi_{laminaire}$
- Si $Re_T > 5000$ alors le régime est turbulent et $\phi = \phi_{turbulent}$
- Si $Re_L > 5000$ et $Re_T < 5000$ alors le régime est transitoire et $\phi = (\phi_{laminaire} + \phi_{turbulent})/2$

L'évolution du diamètre en fonction du temps est représentée graphiquement et la pente de la courbe $\frac{d\phi}{dt}$ est déterminée à chaque instant t.

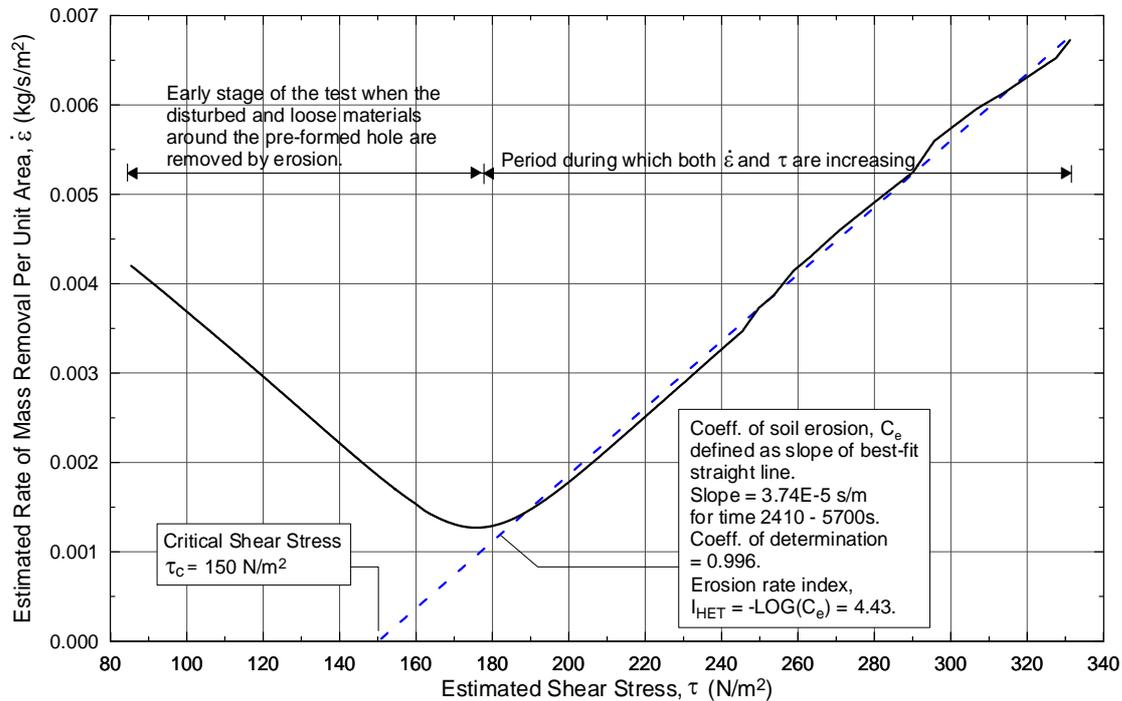


Figure 1.44 : Résultats typiques de Wan et Fell (2002)

La contrainte de cisaillement τ et le taux d'érosion par unité de surface $\dot{\varepsilon}$ sont calculés respectivement à partir des équations 2.1 et 2.2 puis leur évolution est représentée graphiquement (dans l'éq 2.2, $\dot{\phi}$ est approximé par $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$)

L'évolution de $\dot{\varepsilon}$ en fonction de τ est tracée et on détermine les paramètres de la loi d'érosion :

$$\dot{\varepsilon} = C_e(\tau - \tau_c) \quad (2.11)$$

graphiquement. La contrainte critique τ_c et la pente C_e (noté également k_{er} dans la suite du manuscrit) de la courbe sont déterminées comme sur la Figure 1.44.

La principale limitation dans l'interprétation des essais de Wan et Fell réside dans l'hypothèse d'une évolution linéaire des facteurs « de friction ». Cette hypothèse est utilisée pour palier à l'absence de mesure instantanée du diamètre du trou. Cependant plusieurs problèmes majeurs se posent : absence d'arguments physiques validant cette hypothèse et grande sensibilité des grandeurs estimés sur les facteurs de frictions initiaux et finaux.

Soulignons, pour finir que Bonelli et al. (2004, 2006) ont également proposé une méthode d'interprétation des essais. Cette dernière partant d'une analyse dimensionnellement et supposant a priori une loi d'érosion du type 2.11 repose sur des lois d'écoulement reliant débit (ou vitesse moyenne), différence de pression et rayon. Or ces lois soulèvent certains problèmes. En effet, elles sont certes bien établies d'un point de vue empirique mais seulement lorsque le régime d'écoulement turbulent est pleinement avéré. Cela pose donc des difficultés lorsque les écoulements sont transitoires entre régime laminaire et turbulent ce qui est le cas en pratique dans un certain nombre d'essais HET.

Pour mieux caractériser le phénomène, il serait pertinent de mesurer un paramètre supplémentaire, comme la variation de masse solide. On pourrait alors connaître, à tout instant, un paramètre caractéristique de l'érosion et les valeurs obtenues pour les autres paramètres (diamètre du trou, coefficient d'érosion du sol, contrainte de cisaillement critique) devraient être plus proches de la réalité.

C'est sur ce point que notre approche expérimentale est différente. Nous n'introduisons pas de facteurs de friction et nous déterminons le diamètre instantané à partir de la turbidité instantanée de l'eau sortie à l'aval du trou. Le détail de notre approche est présenté dans le chapitre 4.

1.4 CARACTERISATION DE LA DISPERSION

1.4.1 Essai pour l'identification de la dispersion du sol

Les essais les plus utilisés pour identifier la dispersion d'un sol sont le Double Hydrometer Test (ASTM D4221-99), le Crumb Test (ASTM D6572-00) et le Pinhole Test (Sherard et al., 1976b ; ASTM D4647-93). L'application de ces essais est cependant restreinte à seulement quelques types de sol.

1.4.1.1 Essai à l'aiguille (« Pinhole Test »)

Le Pinhole test donne une méthode pour identifier les caractéristiques dispersives des sols argileux. Par rapport au crumb test, le double hydrometer test et le soluble salts in pore water, 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 1.45.

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. A 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 :

- pour la méthode A et C : ND1 (non dispersif), ND2 (non dispersif), ND3 (légèrement dispersif), ND4 (modérément dispersif), D2 (dispersif) et D1 (très dispersif).
- pour la méthode B : ND (non dispersif), SD (légèrement dispersif), D (dispersif).

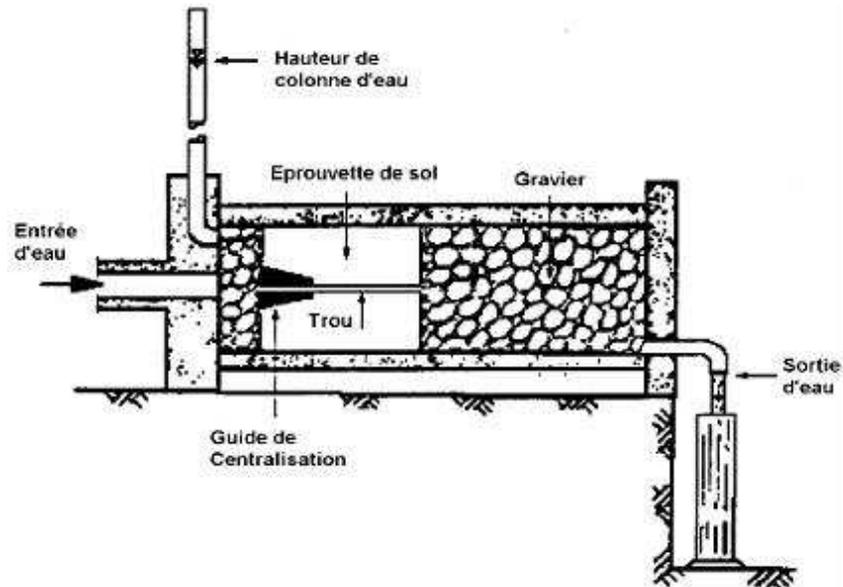


Figure 1.45 : Schéma de principe de Pinhole Test (d'après ASTM D4647-93)

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 élevée (>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.

1.4.1.2 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.

Méthodologie

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 1.46) :

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.

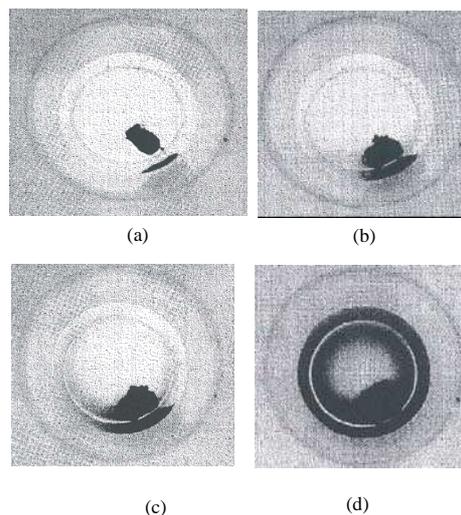


Figure 1.46 : Essais typiques de « Crumb test », a) niveau 1 : non dispersif, b) niveau 2 : intermédiaire, c) niveau 3 : dispersif, d) niveau 4 : très dispersif (d'après ASTM D6572-00)

1.4.1.3 Essai sédimentométrique en parallèle (« Double Hydrometer Test »)

L'idée de l'essai du Double Hydrometer 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 floculats 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.

Méthodologie

L'essai consiste à déterminer le pourcentage de particules de sol de diamètre inférieur à 5 µm dans deux suspensions identiques (5 µm 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 1.47). Le dispositif est montré sur la Figure 1.48. Le rapport D est alors calculé selon la formule ci-dessous.

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

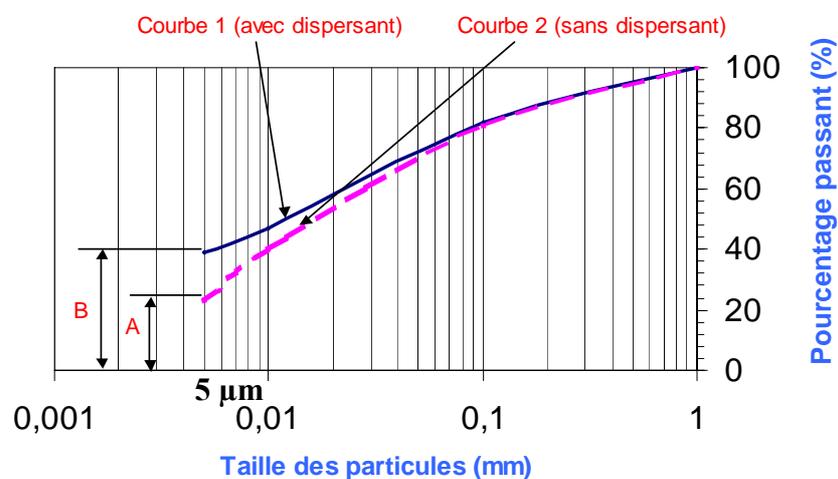


Figure 1.47 : Double Hydrometer Test



Figure 1.48 : 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.

Tableau 1.4 : Classification de la dispersion des sols (Sherard et al., 1976a)

% Dispersion	Etat du sol
$D < 30 \%$	non dispersif
$30 \% < D < 60 \%$	probablement dispersif
$D > 60 \%$	dispersif

Selon Decker et Dunnigan (1977), le Double Hydrometer Test reste fiable à seulement 85% environ pour identifier des sols dispersifs ($D > 30\%$).

1.4.1.4 Zétamètre

De manière complémentaire, la dispersion du sol c'est-à-dire les propriétés de stabilité des suspensions de particules a été étudié à l'échelle microscopique à l'aide de la zétamétrie. Cette technique permet de mettre en évidence les forces inter-particulaires de type électrostatique. Ces forces sont variables en fonction de la nature des particules et de la solution en contact. Combinées à la force de Van der Waals, ces deux types d'interaction constituent les bases de la théorie Derjaguin, Landau, Verwey and Overbeek (DLVO) qui prévoit l'état des particules en suspension (thermodynamiquement ou cinétiquement stable dans l'état dispersé, agrégé ou flocculé).



Figure 1.49 : Zétamètre au LCPC (microélectrophorémètre)

Le potentiel zêta (Hunter, 1981) est un potentiel électrique porté par le plan de cisaillement hydrodynamique des particules colloïdales en suspension, en d'autre terme le plan qui sépare la solution entraînée par la particule chargée, mise en mouvement sous l'effet d'un champ électrique, et le liquide immobile qui l'entoure. Le potentiel zêta représente la force de répulsion/attraction entre particules et est relié à la notion de cohésion dans les sols fins. Ces interactions jouent un rôle primordial dans la stabilité et la sédimentation des suspensions et donc dans la dispersivité des particules. Des faibles valeurs de potentiel (intervalle $[-30 \text{ mV}, +30 \text{ mV}]$ d'après Riddick, 1968) favorisent ainsi l'agrégation et la sédimentation des particules fines.

1.4.2 Conclusions sur les essais de dispersion du sol

Parmi les trois essais de type Crumb test, Double hydrometer test et Pinhole test, le Crumb test est le plus simple à réaliser. Il donne des résultats rapides et répétables mais ces résultats restent qualitatifs. Cet essai peut être cependant amélioré afin de donner des résultats

plus quantitatifs (par exemple, en mesurant l'affaissement de l'échantillon et l'élargissement du nuage de la suspension colloïdale suivant le temps...). Le Crumb test peut alors être utilisé comme un indicateur rapide pour prédire la dispersion d'un sol, en préliminaire avant la réalisation d'autres essais. Nous présenterons plus en détail les améliorations de cet essai dans le chapitre 6.

Le Double hydrometer test, quant à lui, donne généralement des résultats similaires à ceux du Pinhole test. Il s'avère donc être également un bon indicateur. Nous verrons cependant dans le chapitre 6 que cet essai doit être interprété avec précaution.

Parmi les essais de dispersion, le Pinhole test reste le plus fiable. Cet essai est réalisé en général avec de l'eau distillée à pH de 5,5 à 7 mais il est possible de changer la concentration ionique, le type de cation en solution (NaCl, CaCl₂...) pour obtenir des résultats complémentaires. Un autre avantage du Pinhole test est qu'il permet de déterminer l'efficacité du traitement appliquée à des argiles dispersives. Ce traitement consiste à mélanger le sol avec différentes quantités d'additifs (Ca(OH)₂, Fe₂O₃...). Le Pinhole est ensuite utilisé pour déterminer la quantité nécessaire pour réduire le phénomène d'érosion.

Le Pinhole Test n'est pas uniquement un essai spécifique pour l'identification des argiles dispersives mais il permet également de caractériser le phénomène d'érosion en faisant intervenir les effets mécaniques de l'écoulement qui évoluent au cours du test. Cet essai donne une estimation qualitative de la dispersion ou de la défloculation des sols argileux cependant une interprétation quantitative de l'essai est très délicate (Tarog, 2000).

1.5 CONCLUSIONS

Après avoir étudié les différents appareillages utilisés dans les essais d'érosion, nous avons décidé de retenir l'Erodimètre à Jets Mobiles (EJM) et le « Hole Erosion Test » (HET) pour notre programme expérimental.

L'appareillage de l'Erodimètre à Jets Mobiles peut être utilisé pour la réalisation d'essais d'érosion non seulement en laboratoire mais également in situ. L'appareil a été construit et développé par Hénensal *et al.* (1987) au LCPC avec son protocole d'essai. Nous proposons dans le chapitre 3 un nouveau protocole plus à même de quantifier le phénomène d'érosion.

Le « Hole Erosion Test » est l'essai le plus récent et le plus performant pour la caractérisation quantitative de l'érosion d'interface. En se basant sur l'appareil développé par Wan et Fell (2002, 2004), nous avons développé l'appareillage ainsi que le protocole d'essai de manière à rendre cet essai plus précis au niveau des mesures et plus pratique au niveau de la manipulation. Ce travail sera présenté dans le chapitre 4.

Concernant l'étude du phénomène de dispersion du sol, nous avons réalisé des essais de dispersion classiques tels que le Double Hydrometer Test, le Crumb Test et le Pinhole Test. Nous avons développé un nouvel essai d'émiettement qui se base sur le Crumb Test. Cet essai modifié présenté dans le chapitre 5 est devenu un essai à caractère quantitatif, évolutif et comparable avec les autres essais d'érosion.

Chapitre 2 : Approche expérimentale et propriétés des matériaux testés

2.1 APPROCHE EXPERIMENTALE

Dans le chapitre 1 nous avons vu que l'érosion était un phénomène mécanique et physico-chimique se traduisant par le détachement des particules les plus fines et leur transport. D'autre part nous avons vu que l'érosion pouvait concerner la surface du sol (érosion externe) et les circulation interne d'un ouvrage (érosion interne). Les particules transportées pouvant être de nature argileuse sont alors susceptibles d'être soumises au processus de défloculation entraînant alors la dispersion du sol.

Ces trois phénomènes identifiés lors de l'étude bibliographique menée sur des ouvrages existants: érosion externe, érosion interne et dispersion sont au cœur de ce travail. Afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu, des essais en laboratoire ont été nécessaires. Ces derniers sont issus d'une recherche bibliographique qui a permis d'en cerner les domaines de validité et de proposer des améliorations aux protocoles en vigueur. Un plan d'expérience en découle afin de les tester sur différentes textures de sols reconstitués.

Pour ce qui concerne l'érosion externe : historiquement le LCPC a été impliqué dans la problématique de l'érosion externe au travers des travaux d'Hénensal (1983, 1986, 1990) sur l'érodimètre à jets mobiles. L'appareillage d'origine existait au LCPC depuis sa mise au point et c'est tout naturellement qu'il a trouvé sa place dans ce travail. Des améliorations ont bien évidemment été apportées depuis en y apportant une composante de quantification (voir détail chapitre 3).

L'avantage de cet appareillage est de pouvoir réaliser des mesures in situ, ce qui a été fait dans le cadre de ce travail de thèse. Ne disposant pas toujours d'une valeur de référence pour un sol, cet essai a été utilisé pour connaître l'efficacité de produits de traitement par rapport à un sol non traité et d'assurer le lien entre le laboratoire et le naturel.

Pour ce qui concerne l'érosion interne, le « hole erosion test » mis au point par Wan et Fell (2002, 2004) visait lui aussi un aspect quantitatif. Les modifications apportées à l'appareillage visent à obtenir une plus grande maniabilité de l'appareil tout en améliorant la précision de la mesure et une automatisation de l'exploitation des résultats (voir chapitre 4). Pour dégager des différences au niveau des textures des sols modèles étudiés notre programme expérimental a été élaboré en faisant varier les proportions mais aussi la nature de l'argile dans les mélanges de sols. Des observations au microscope électronique à balayage de type environnemental seront faites pour tenter de comprendre les phénomènes à petites échelles au niveau du trou.

Pour ce qui concerne la dispersion des sols, trois essais ont été retenus dans ce travail.

Tout d'abord le « pinhole test » considéré comme étant un essai fiable pour simuler la dispersion des sols. Cet essai consiste à faire s'écouler de l'eau distillée dans un petit trou pratiqué dans une éprouvette de sol ; il permet l'obtention d'un résultat rapide avec plusieurs niveaux de dispersion (voir chapitre 5).

Ensuite le « crumb test », dont le mode opératoire d'origine a aussi été modifié dans la géométrie du corps d'épreuve mais aussi dans la réalisation de l'essai pour tenter d'accéder à un aspect quantitatif (voir chapitre 5). Néanmoins cet essai d'émiettement dépendant d'une classification visuelle n'a pas permis de discerner efficacement les textures mises en œuvre. Enfin le Double Hydrometer, dont le protocole n'a pas été modifié, a été appliqué à 9 textures de sols (voir chapitre 5) et les résultats ont permis de discriminer ces textures selon trois niveaux de dispersion, ces niveaux étant directement corrélables avec la proportion d'argile incorporée au sol.

Il semble bien admis que les proportions d'argiles ainsi que la nature de ces dernières donnent une réponse différente aux différents essais. Il nous a donc paru intéressant de se pencher sur des aspects intervenant à un niveau plus microscopique et de mesurer le potentiel zéta des trois argiles de cette étude ; la kaolinite, l'illite et la montmorillonite (voir chapitre 5).

2.2 PROPRIETES DES MATERIAUX TESTES

Afin de disposer de sols en quantité et qualité suffisantes et représentant un spectre varié de textures, nous avons choisi de reconstituer des éprouvettes à partir de trois matériaux de référence représentant trois classes granulométriques différentes : l'argile, le limon et le sable. Cela nous a permis d'avoir un bon contrôle des propriétés du sol et une répétitivité satisfaisante lors de la préparation des échantillons. Les matériaux que nous avons retenus pour les essais sont un sable monogranulaire, un limon propre et pour les argiles : la kaolinite, l'illite, la montmorillonite, afin de disposer d'un panel large de sensibilité à l'eau.

Tous les types d'essais mis en œuvre dans notre programme d'essai sont effectués avec les mêmes textures de sols afin de disposer d'éléments de comparaison et de faciliter la mise en évidence d'une relation entre les phénomènes d'érosion ou de dispersion avec les caractéristiques des sols.

2.2.1 Matériaux bruts

Les matériaux bruts utilisés afin de reconstituer les différentes textures de sols sont un sable de Fontainebleau, un limon de Rouen, et trois argiles : une montmorillonite, une illite d'Arvel, et une kaolinite armoricaine. Seront abordés successivement l'aspect granulométrique et chimique des produits purs ou des mélanges.

Granulométrie

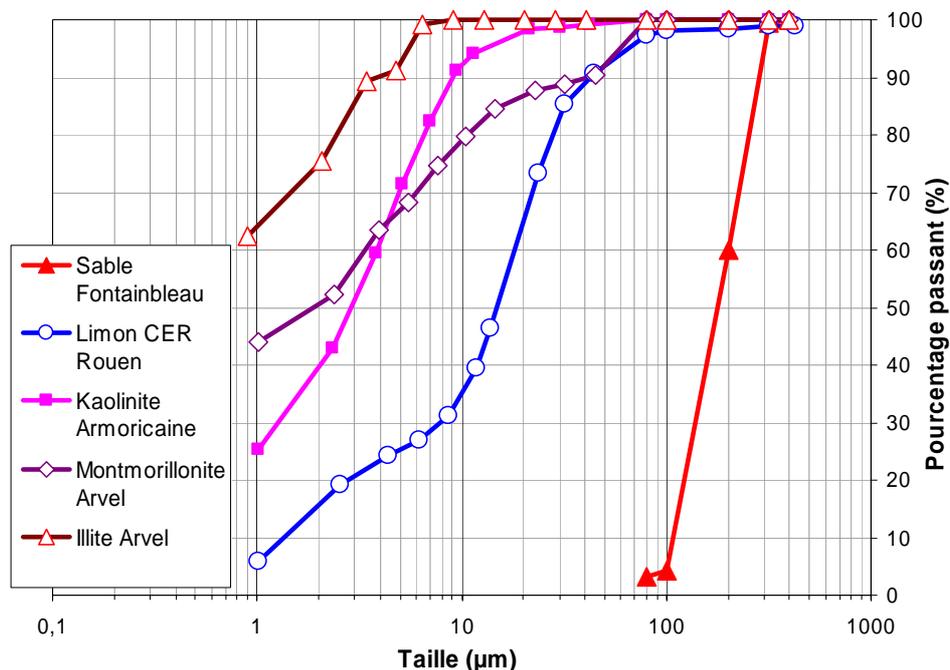


Figure 2.1 : Granulométrie des matériaux bruts

Les analyses granulométriques des matériaux bruts sont réalisées par tamisage selon la Norme NF P 94-056 et sédimentométrie par la Norme NF P 94-057.

La distribution des tailles des particules est présentée dans la Figure 2.1. Les propriétés chimiques de ces argiles sont présentées dans le Tableau 2.1. Les autres analyses de cette argile sont données dans l'annexe A.

Analyses chimiques

Tableau 2.1 : Compositions chimiques typiques de trois types d'argiles

élément	kaolinite	Montmorillonite	Illite	Sable	Limon
SiO ₂	48%	57%	46%	100%	55%
Al ₂ O ₃	36%	18%	21%	-	18%
K ₂ O	2%	1%	6%	-	10%
Fe ₂ O ₃	1%	4%	7%	-	9%
MgO	-	6%	3%	-	2%
CaO	-	3%	5%	-	2%
Perte au feu	13%	11%	12%	-	4%

Le sable de Fontainebleau HN34 est composé des grains fins, bien arrondis et blancs. La taille des particules est de 100µm à 300 µm (99,8%). La distribution des tailles des particules est présentée dans la Figure 2.1. Il a été décidé d'utiliser un sable roulé compte tenu de la nature alluvionnaire des matériaux dans les vrais ouvrages et de nature quartzreuse, bien qu'à l'échelle de l'essai, le sable calcaire n'ait pas de possibilité de dissolution mais plus parce que la porosité du calcaire est grande. Les propriétés chimiques de ce sable sont présentées dans le tableau 2.1.

Le limon utilisé a été prélevé à Rouen, la distribution des tailles des particules est présentée dans la Figure 2.1. Ce matériau est essentiellement composé de quartz avec un peu de feldspaths. La partie argileuse est relativement faible, contient essentiellement une illite-muscovite et de la montmorillonite. Les propriétés chimiques de ce limon sont présentées dans le tableau 2.1. Les autres analyses de ce limon sont trouvées dans l'annexe A.

Les essais sont réalisés avec de l'eau du robinet du laboratoire (ville de Paris) et de l'eau distillée. Les analyses chimiques de l'eau présentées dans le Tableau 2.2 ont été réalisées à la division Physico-Chimie des Matériaux du LCPC.

Tableau 2.2 : Types et montant des cations présentés dans l'eau utilisée dans ce travail

Eau	Si mg/L	Fe mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	Mn mg/L	S mg/L	Cl mg/L
Robinet	1,88	0,74	90,06	3,33	5,28	1,81	0,06	7,11	23,25
Distillée	0,94	0,00	0,38	0,14	0,56	0,00	0,00	0,19	0,89

2.2.2 Sols reconstitués par mélange de deux composants argiles/sable

Dans le but de mieux étudier le rôle de chaque matériau brut composant les mélanges, différents mélanges entre argile et sable sont créés. Le pourcentage en masse de matériau de la fraction argileuse est varié sur une plage allant de 10 à 100%, comme le montre le tableau. Les abréviations sont : K = Kaolinite ; S = Sable ; M = Montmorillonite ; I = Illite. Ainsi K30S70 correspond à un mélange de l'argile de type kaolinite à hauteur de 30% et de sable à 70%.

Tableau 2.3 : Propriétés physiques des textures composées d'argile et de sable

Nature d'argile dans le mélange	Texture	% Argile	% Sable	Teneur en eau optimale (%)	Masse volumique maximale (t/m ³)
Kaolinite	K10S90	10	90	5	2,15
	K20S80	20	80	7	2,10
	K30S70	30	70	9	2,00
	K50S50	50	50	16	1,80
	K70S30	70	30	20	1,60
	K90S10	90	10	24	1,50
	K100S0	100	0	26	1,40
Illite	I10S90	10	90	9	2,0
	I20S80	20	80	10	1,96
	I30S70	30	70	13	1,91
	I50S50	50	50	15	1,73
	I70S30	70	30	19	1,56
	I90S10	90	10	20	1,42
	I100S0	100	0	21	1,38
Montmorillonite	M10S90	10	90	11	1,92
	M20S80	20	80	14	1,80
	M30S70	30	70	16	1,75
	M50S50	50	50	21	1,50
	M70S30	70	30	23	1,30
	M90S10	90	10	24	1,15
	M100S0	100	0	25	1,05

La méthode de détermination de la masse volumique maximale ainsi que des propriétés mécaniques de ces mélanges ont été détaillées par Reiffsteck *et al.* (2007).

2.2.3 Sols reconstitués par mélange de trois composants argile/limon/sable

Dans le but d'approcher la texture des sols naturels et d'obtenir des sensibilités à l'érosion pouvant être mis en liaison avec la classification géotechnique classique des sols, plusieurs textures différentes de sol « modèles » ont été reconstituées pour réaliser des essais. Les textures sont reconstituées avec trois matériaux bruts : l'argile de type kaolinite, le limon de Rouen et le sable de Fontainebleau.

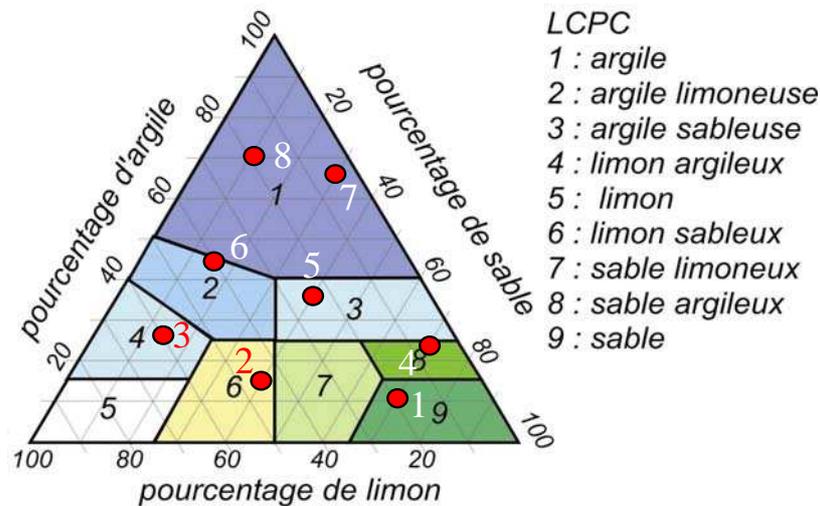


Figure 2.2 : Différentes textures de sol testées dans le diagramme ternaire

Nous avons décidé de tester des mélanges de sols naturels et remaniés qui correspondraient le plus possible à une classe de la classification texturale USCS/LCPC représenté sur le diagramme ternaire de type pédologique avec dénomination LCPC de la Figure 2.2.

Concrètement, nous avons essayé de placer les points le plus au centre possible des différentes zones du diagramme. Nous avons fait ce choix car l'objectif de l'étude menée est de relier dans des conditions d'essai conventionnelles réalisables en laboratoire ou sur chantier, la sensibilité à l'érosion d'un sol à une classification familière au monde du génie civil et des travaux publics en particulier (LCPC et SETRA, 1992).

Nous insistons sur le fait que nous avons fait le choix de tester ces sols modèles reconstitués à des états de densité élevés et dans un état de non-saturation défini par l'essai Proctor car notre objectif est de cerner la vulnérabilité des ouvrages géotechniques de type remblai routier ou ferroviaire soumis accidentellement à une charge hydraulique (voir Introduction).

Les courbes granulométriques sont données dans le graphe figure 2.3.

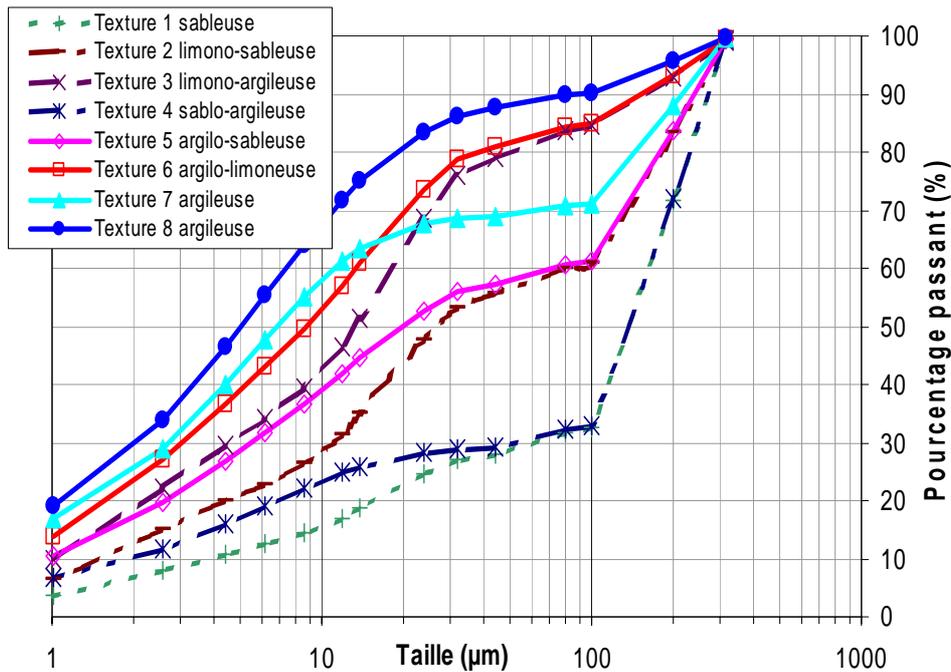


Figure 2.3 : Granulométrie des textures du sol

Les propriétés physiques des textures sont présentées dans le Tableau 2.4. La numérotation des textures est réalisée de manière augmentée avec le pourcentage d'argile dans le mélange. Le pourcentage de chaque composant est présenté dans le Tableau 2.4 et dans le diagramme ternaire (Figure 2.2).

Tableau 2.4 : Propriétés physiques des textures composées d'argile, du limon et du sable

Symbole d'identification	Texture	Pourcentage des composants			Limites d'Atterberg			Essai de compactage	
		% Argile	% Limon	% Sable	w_L (%)	w_P (%)	IP (%)	Teneur en eau optimale (%)	Masse volumique maximale (t/m^3)
1	Sableuse	10	20	70	13,6	#	#	13	20
2	Limono-sableuse	15	45	40	14,6	12,7	2,0	13	20
3	Limono-argileuse	25	60	15	25,5	21,2	4,3	13	20
4	Sablo-argileuse	25	5	70	13,5	#	#	11	20
5	Argilo-sableuse	35	25	40	19,6	13,9	5,7	13	20
6	Argilo-limoneuse	45	40	15	26,9	20,4	6,5	16	19
7	Argileuse	65	5	30	26,1	21,7	4,4	19	17
8	Argileuse	70	20	10	35,2	30,0	5,2	26	16

Les limites de plasticité et de liquidité des textures sont réalisées selon la Norme NF P 94-051. En tenant compte qu'en réalité le compactage n'atteint jamais 100%, le degré de compactage pour les sols est fait à 95% Optimum Proctor Normal (OPN). La teneur en eau optimale et densité sèche maximale de chaque texture est donnée dans le Tableau 2.4 : Propriétés physiques des textures composées d'argile, du limon et du sable. La courbe granulométrique de chaque texture est présentée dans la Figure 2.3.

2.3 DEMARCHE EXPERIMENTALE

Afin d'évaluer et de comparer les processus d'érosion et de dispersion, un programme expérimental qui comprend des essais à différentes échelles sur plusieurs textures de sol reconstitué de référence ou naturel a été mené.

2.3.1 Objectif

La complémentarité des techniques expérimentales mises en œuvre pour estimer la stabilité à l'érosion, permettra de dissocier les mécanismes dus à la dispersion, à la contrainte de cisaillement à l'interface sol-fluide, à la vitesse de l'écoulement.

On peut classer dans une liste allant de l'essai le plus mécanique vers le plus à même d'investiguer l'aspect physicochimique :

- Erodimètre à Jets Mobiles,
- Essai de trou,
- Essai du trou d'aiguille,
- Essai d'émiettement amélioré,
- Sédimentation,
- Sédimentation en parallèle,
- Zétamétrie.

De nombreux auteurs ont mis en évidence la complexité de l'interaction entre la part de l'érosion due à un travail mécanique et celle due aux forces électrochimiques (Hénensal, 1986 ; 1987 ; Perry, 1979 ; Sanchez *et al.*, 1983). L'étude des corrélations de la mesure du potentiel zêta et des paramètres mécaniques nous donnera aussi une vision plus complète du processus de dispersion de la matrice argileuse des sols dans l'environnement d'un fluide qui peut être à l'origine de pathologie sur les ouvrages.

Cette étude comparative des techniques d'essais a été complétée par une analyse multi-échelle (du macro vers le micro) comprenant l'analyse de la susceptibilité des différents types de colloïdes composant la matrice du sol (limon, argile de type kaolinite, illite ou smectite) à se disperser dans un fluide chargé de cations de différentes valences avec des observations en microscopie (Figure 2.4).

La dissociation des deux « axes » ne semble toutefois pas évidente. En effet, les dispositifs expérimentaux développés pour aller du mécanique vers le physicochimique ou du macro vers le micro sont les mêmes. Seule la comparaison des essais réalisés sur les matériaux de référence et des mélanges permettront de mettre en évidence des différences.

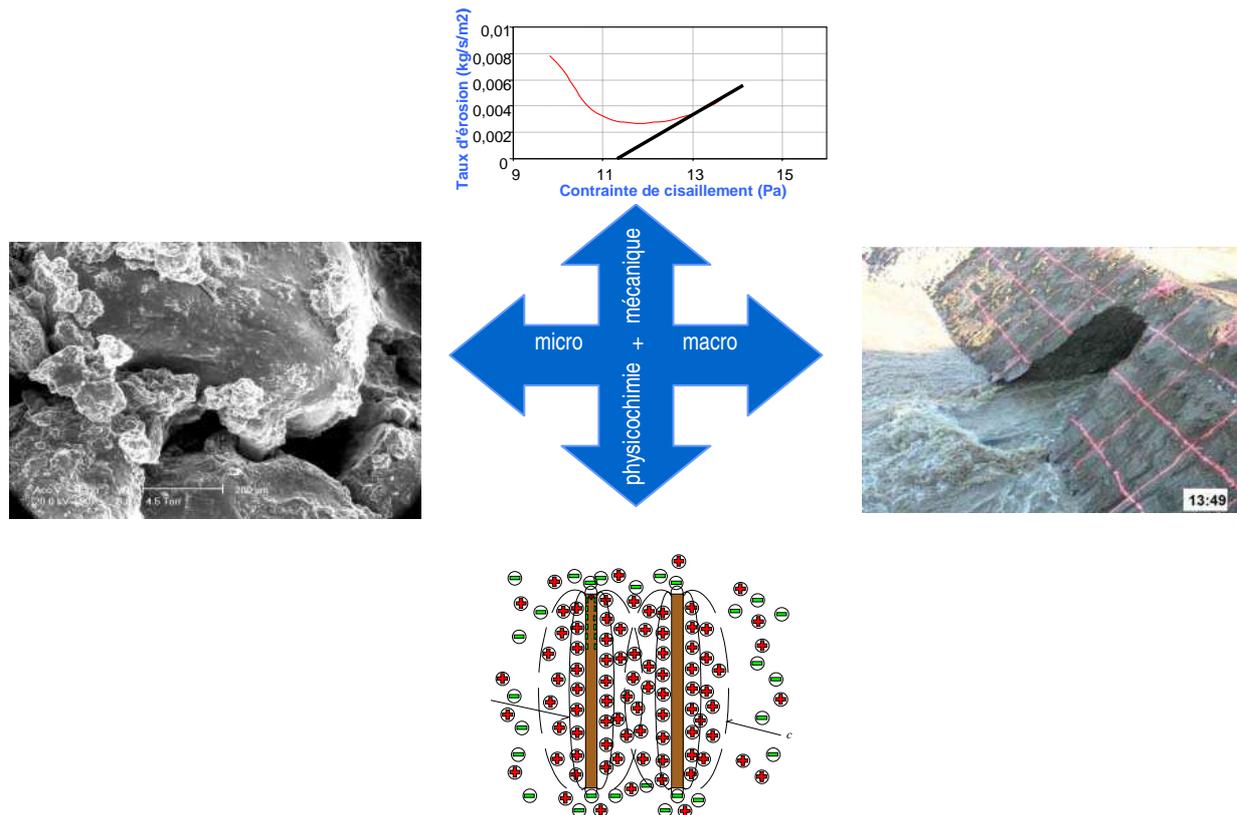


Figure 2.4 : Démarche expérimentale

De façon naturelle, nous avons fondé notre étude de sensibilité sur une démarche progressive en faisant varier les paramètres dans l'intervalle possible et avec un pas de variation acceptable puis nous avons orienté nos essais en fonction des résultats obtenus. On cherche en général l'effet maximum de chacun des paramètres sur la réponse. Pour cela, nous cherchons à :

- faire un nombre minimum d'essais,
- obtenir un maximum de précision sur les résultats,
- être capable de mettre en évidence des phénomènes secondaires comme des interactions entre les facteurs.

Les difficultés ne s'arrêtent pas aux essais. Une fois ceux-ci réalisés, il faut interpréter les résultats. C'est le moment où l'on se dit souvent : « les essais que j'ai réalisés étaient-ils nécessaires ou pas ? J'aurai dû faire d'autres essais ! »

Pendant une étude de sensibilité, il est en effet judicieux de se poser quelques questions supplémentaires :

- Quelle stratégie d'essai adopter pour arriver rapidement aux résultats attendus ?
- N'existe-t-il pas de meilleures stratégies que d'autres ?
- Quel est le nombre minimum d'essais qui doivent être réalisés pour aboutir aux résultats ?
- Ne peut-on pas éviter de réaliser des essais inutiles ?
- Comment améliorer la précision des résultats ?

Toutefois, nous n'avons pu aller plus avant dans l'élaboration d'un plan d'expérience du fait des modifications effectuées sur les appareillages et les modes opératoires au cours de notre étude.

2.3.2 Amélioration/modification de protocoles existants

Lors de l'initiation de ce travail de thèse, les dispositifs d'essais, la préparation de l'échantillon, les protocoles d'essais destinés à être utilisés étaient ceux disponibles dans le commerce ou définis dans les documents normatifs ou de référence du domaine. Toutefois face à la carence de ces essais ou modes opératoires à fournir des données adaptées à nos objectifs, le phénomène d'érosion a été étudié par des appareillages conçus et développés au LCPC au cours de ce travail de thèse.

Les modifications des différents modes opératoires ont été nécessaires et ont permis de rendre partiellement possible la comparaison des différentes techniques d'essais. Elles sont exposées aux chapitres 3, 4 et 5. Lors de ces modifications ou adaptations mécaniques ou méthodologique, l'objectif principal a été de pouvoir mettre à la disposition de l'utilisateur final des mesures quantitatives.

2.3.3 Programme expérimental

Le programme expérimental proposé s'intéresse au processus d'érosion et de dispersion de la matrice argileuse de sols structurés à l'aide des différents types d'essais suivants (Figure 2.5) :

- essais d'érosion par jets avec l'érodimètre à jets mobiles LCPC (EJM),
- essais d'érosion interne avec l'essai de trou LCPC (HET),
- essais de dispersion avec l'essai au trou d'aiguille,
- essais de dispersion avec le crumb test et l'essai d'émiettage LCPC,
- des essais de sédimentation en parallèle.

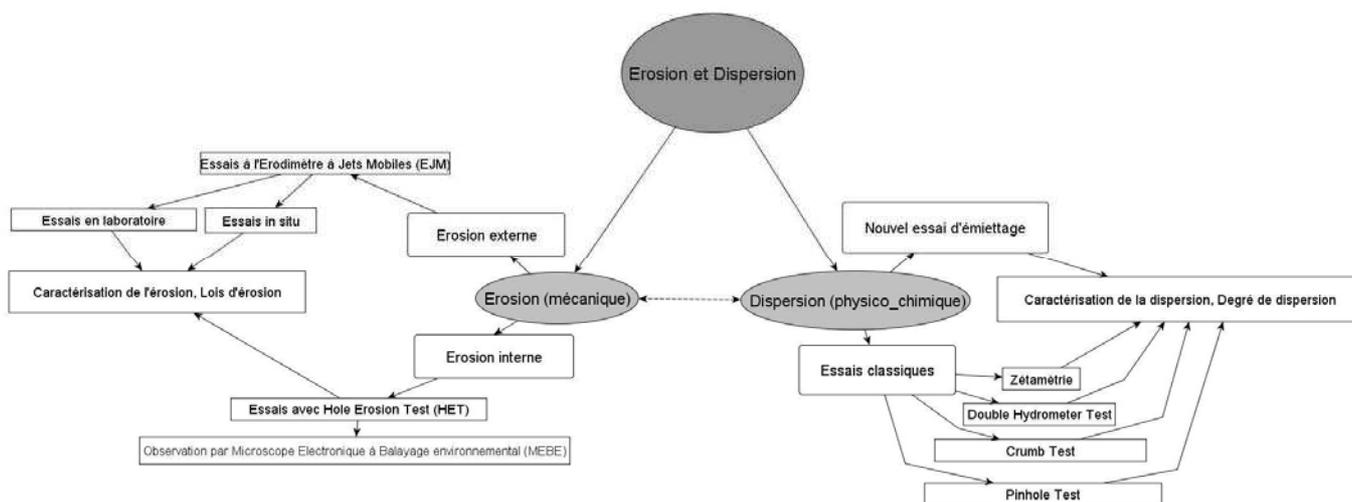


Figure 2.5: Approche expérimentale

Les paramètres d'entrée fixés lors des essais sont tout particulièrement la porosité, exprimée en terme de texture et d'indice des vides ou d'énergie de compactage, ainsi que la sensibilité à l'eau de la fraction fine cernée par l'intermédiaire de la caractérisation physico-chimique du sol et du fluide. L'analyse de la susceptibilité des différents types de colloïdes composant la matrice du sol (limon, argile de type kaolinite, illite ou smectite) à se disperser dans un fluide chargé de cations de différentes valences a été étudiée avec :

- un microscope électronique à balayage environnemental,
- un zétamètre.

La susceptibilité de certaines fractions granulométriques à être arrachées par le flux hydrique lors de l'essai de trou a été observée avec un microscope électronique à balayage environnemental.

Complémentaires aux essais de dispersivité, le potentiel zêta a été mesuré pour les différents types d'argiles utilisées pour réaliser les sols 'modèles' de cette étude puis sur les mélanges eux-mêmes constitutifs de ces sols.

Tableau 2.5 : Programme expérimental

Type de sol	Type d'argile	Essai d'érosion		Essai de dispersion						
		Erodimètre à Jets Mobiles (EJM)	Hole Erosion Test (HET)	protocole classique			nouveau protocole			
				Pinhole Test	Crumb Test	Double Hydrometer Test	Essai d'émiettage	Zétamétrie		
Sol reconstitué au laboratoire	Mélange: Sable, Argile	Kaolinite (K)	K10S90					1		
			K30S70	22 (P10, 20, 30, 40, 50)				2		
			K50S50	12 (P20, 30, 40, 50)				2		
			K70S30	10 (P30, 40, 50, 60)				1		
			K90S10					1		
			K100	8 (P50,60, 70, 80, 90, 100,110)			3	2	28	
		Illite (I)	I10S90						1	
			I25S75	14 (P90, 150, 180, 200, 220, 300)					1	
			I30S70	14 (P90, 100, 150, 180, 200, 250, 300)					1	
			I50S50	8 (P150, 180, 220, 300)					1	
			I70S30	4 (P50, 90, 150)					1	
			I90S10						1	
	Montmorillonite (M)	I100						2	42	
		M10S90						1		
		M30S70	5 (P30, 50, 70, 90)					1		
		M50S50	5 (P30, 50)					1		
		M70S30						1		
		M90S10						1		
	Mélange: Sable, Limon, Argile	Kaolinite (K)	M100					2	20	
			Texture 1	essai préliminaire	essai préliminaire	3	3	1	1	
			Texture 2	essai préliminaire	essai préliminaire	3	3	1	1	
Texture 3			essai préliminaire	essai préliminaire	3	3	1	1		
Texture 4			1	10 (P15, 20, 25)	3	3	1	1		
Texture 5			1	11 (P15, 20, 25)	3	3	1	1		
Texture 6			1	5 (P15, 20, 25)	3	3	1	1		
Texture 7			1	7 (P15, 25, 35, 45)	3	3	1	1		
Texture 8	3	8 (P15, 25)	3	3	1	1				
Sol in situ	Montoire	Argile (K,M)	10						20	
	Site 1	Limon argileux	18							
	Site 2	Limon sableux	22							

P : pressions d'essai, en italique : ancien appareillage

2.3.4 Répétitivité

Pour les différents types d'essais des essais de répétitivité ont été réalisés sur au moins trois échantillons pour la même texture et les mêmes conditions expérimentales. La bonne répétitivité des essais a permis de valider notre procédure expérimentale.

Lorsque l'érodimètre à jets mobiles a été mis en œuvre sur le terrain, la variabilité d'état de surface et de densité naturelle étant importante à une aussi petite échelle que celle de la chambre de pluviation, nous avons, répété les essais sur le terrain de manière systématique afin de pouvoir analyser les informations acquises et les traiter statistiquement.

2.4 CONCLUSIONS

Dans le but d'étudier le phénomène d'érosion et de dispersion, notre approche expérimentale comprend des expériences à différents types et aux différentes échelles dans les deux aspects mécanique et physico-chimique. Les essais sont réalisés avec plusieurs textures des sols dans les fluides variées afin de repérer les paramètres principaux influençant les phénomènes.

Le choix a été fait de tester des sols modèles reconstitués à des états de densité élevés et dans un état de non-saturation défini par l'essai Proctor car notre objectif est de cerner la vulnérabilité des ouvrages géotechniques de type remblai routier ou ferroviaire soumis accidentellement à une charge hydraulique. Il ne s'agissait pas dans ce travail de comprendre le comportement d'ouvrages hydrauliques comme des barrages ou des digues ou de sédiments en contextes fluvial ou marin. Si certains résultats de notre étude pourront être extrapolés à ces derniers ouvrages, il est certain qu'un programme expérimental spécifique devra être mis en œuvre pour conclure de manière définitive.

Cette recherche est innovante car elle combine l'étude à l'échelle macroscopique avec différents appareillages développés spécifiquement lors de ce travail avec l'étude microscopique avec des appareillages de pointe au niveau technologique. Cette étude comparative n'a jusqu'à présent pas été faite et peu d'équipes se sont engagées à la fois sur le phénomène physique et physico-chimique. Il va enfin être possible de dissocier ces paramètres alimentant le modèle d'apparition et d'évolution de l'érosion dans les remblais d'infrastructures de transport, digues et barrages, en prenant comme cadre de référence les travaux américains et australiens les plus récents.

En conclusion, les essais choisis dans ce travail ont eu pour but de qualifier au mieux les différents phénomènes d'érosion mis en évidence sur des ouvrages en vraie grandeur dans la synthèse bibliographique. Le travail de laboratoire a eu pour but d'améliorer les protocoles d'essais existants en y apportant si possible une composante de quantification sur des textures choisies judicieusement en fonction des objectifs de ce travail.

Chapitre 3 : Caractérisation de l'érosion par l'essai d'Erodimètre à Jets Mobiles

Nous nous intéressons, dans ce chapitre, à la caractérisation principalement expérimentale de la sensibilité à l'érosion à l'aide de dispositifs d'essai adaptés. Pour cela, nous avons mis en œuvre l'essai d'« Erodimètre à Jets Mobiles » développé par Hénensal et Duchatel (1990). Cet essai, conçu au LCPC et que nous présenterons dans ce chapitre, offre en effet l'avantage d'être à la fois utilisable en laboratoire et sur le terrain.

Le protocole d'essai proposé par Hénensal présente cependant un certain nombre de limites que nous avons cherché à surpasser avec, comme objectif une caractérisation plus fine de l'érosion des sols.

Nous verrons ainsi dans un premier temps, une description de l'essai (appareil et protocoles). Nous présenterons ensuite les essais réalisés sur des sols modèles (textures de référence) en laboratoire dans le but de faire une première « caractérisation » de l'appareil. Enfin, nous verrons deux campagnes d'essais menées in situ dans le but de valider notre approche.

3.1 APPAREILLAGE ET PRINCIPE DES ESSAIS A L'EJM

3.1.1 Généralités

Les travaux initialement réalisés par Hénensal avaient pour objectif de corrélérer la sensibilité à l'érosion externe du sol à des paramètres mesurables en laboratoire tels que la valeur au bleu méthylène, l'activité, la texture et la pente (Hénensal *et al.*, 1990, 1993). Dans le cadre de ces études, un protocole avait été proposé où une unique mesure qualifiait la sensibilité à l'érosion du sol. Cette approche trouve toutefois des limites quand il est question de caractériser plus sensiblement le phénomène d'érosion et nous avons donc sensiblement modifié le protocole expérimental.

Nous verrons ainsi successivement le dispositif d'essais, la préparation des échantillons en laboratoire et les protocoles d'essai employés pour cet appareil qui peut être mis en œuvre sur site ou utilisé en laboratoire.

3.1.2 Appareillage

L'érodimètre à jets mobiles du LCPC, est constitué d'une partie mécanique active appelée « érodeur », d'un réservoir d'eau sous pression et de différents organes de service. L'érodeur, partie essentielle de l'appareillage, est représenté schématiquement en coupe sur la Figure 3.1. L'érodeur projette, à partir de gicleurs de 1,0 mm de diamètre (Figure 3.2a) et perpendiculairement au sol ou à l'échantillon de sol à tester, six jets d'eau de caractéristiques semblables et bien définies.

Les gicleurs sont portés par un bras mobile, en rotation à vitesse constante (5 tours/min), grâce à l'action d'un moteur 24 volts en courant continu. La rotation s'effectue dans une chambre de pluie de 15,2 cm de diamètre (diamètre du moule CBR). Chaque gicleur se trouve à une distance différente de l'axe de rotation et les jets frappent donc le sol suivant six sillons de forme circulaire (Figure 3.2b).

L'érodeur est relié par un tuyau souple à un réservoir de 2 litres d'eau distillée sous pression constante, lui-même relié à une source d'air comprimé contrôlée à l'aide d'un régulateur de pression (RDP). Nous pouvons voir la totalité du dispositif sur la Figure 3.3.

Au cours de l'essai et selon le protocole choisi, les jets impactent donc le sol et l'effluent est recueilli permettant la caractérisation de la sensibilité à l'érosion de l'échantillon testé.

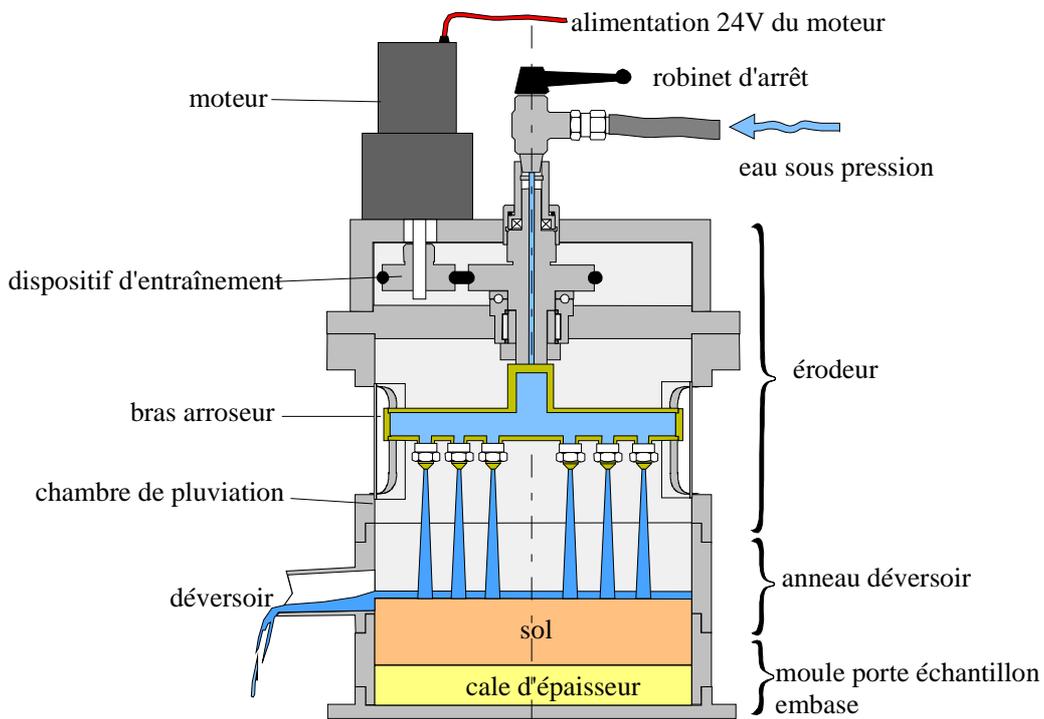


Figure 3.1 : Schéma d'utilisation de l'érodeur en laboratoire

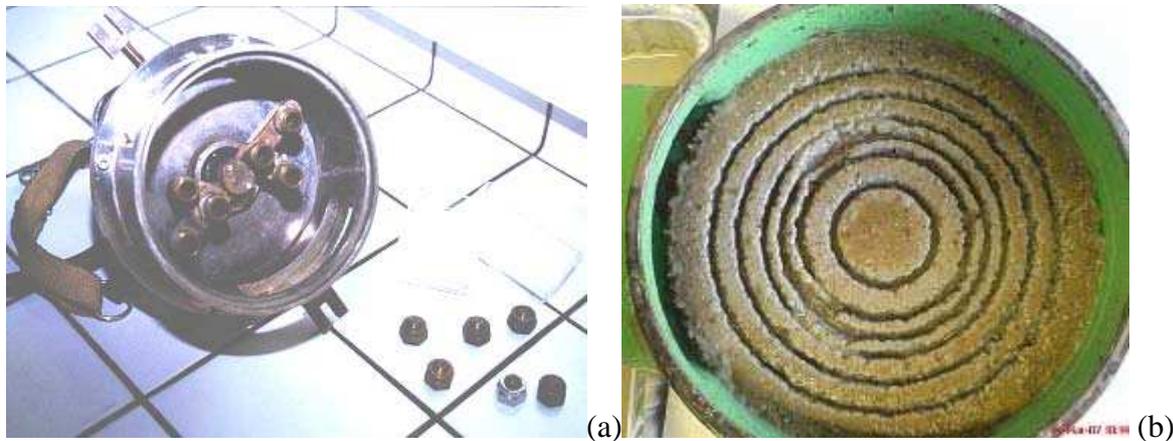


Figure 3.2 : a) Érodeur retourné, montrant sa chambre de pluie dans laquelle tournent les bras portant les gicleurs, b) les sillons d'érosion d'un échantillon

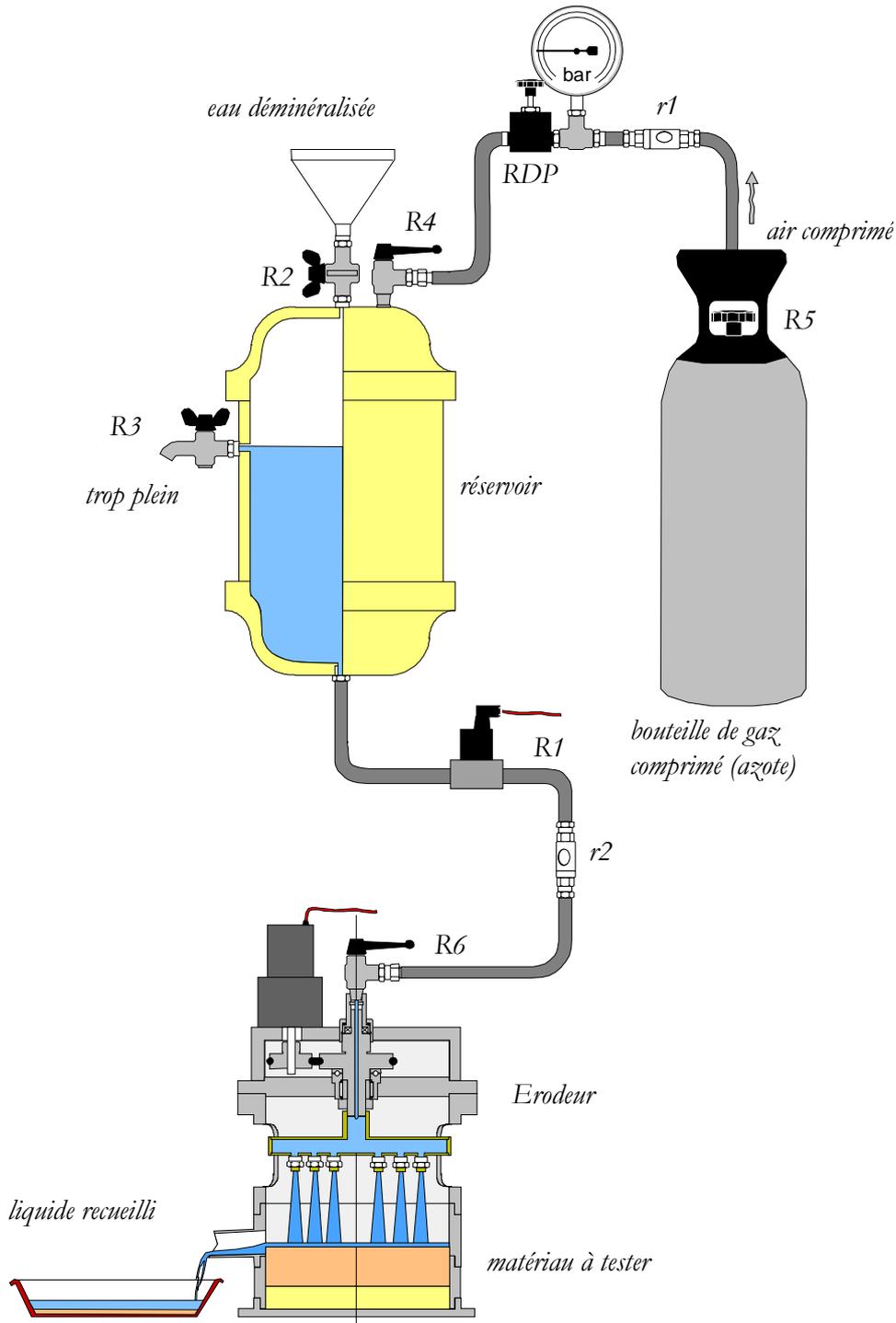


Figure 3.3 : Schéma d'utilisation de l'érodimètre en laboratoire

3.1.3 Echantillon d'essai

En laboratoire, les échantillons d'essai sont réalisés par compactage à une densité sèche et une teneur en eau que l'on peut par exemple prendre à 95% de l'Optimum Proctor. Le compactage statique est réalisé en une seule fois par un presse hydraulique manuelle (Figure 3.5) et le protocole de compactage est présenté Figure 3.4.

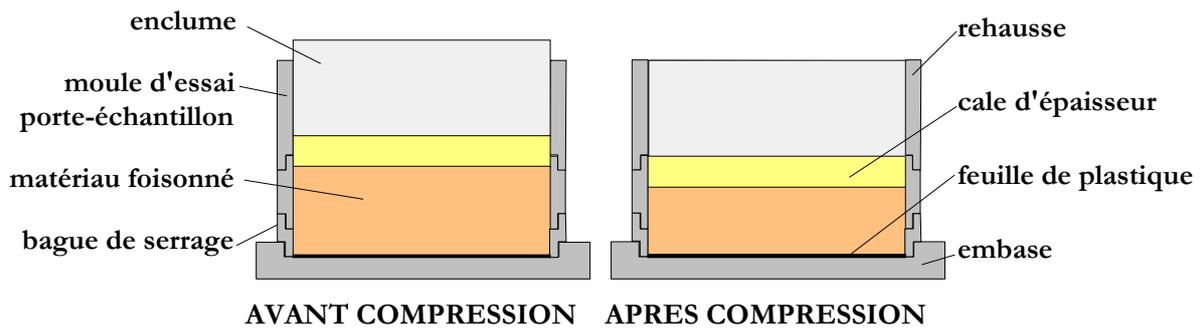


Figure 3.4 : Matériels pour le compactage

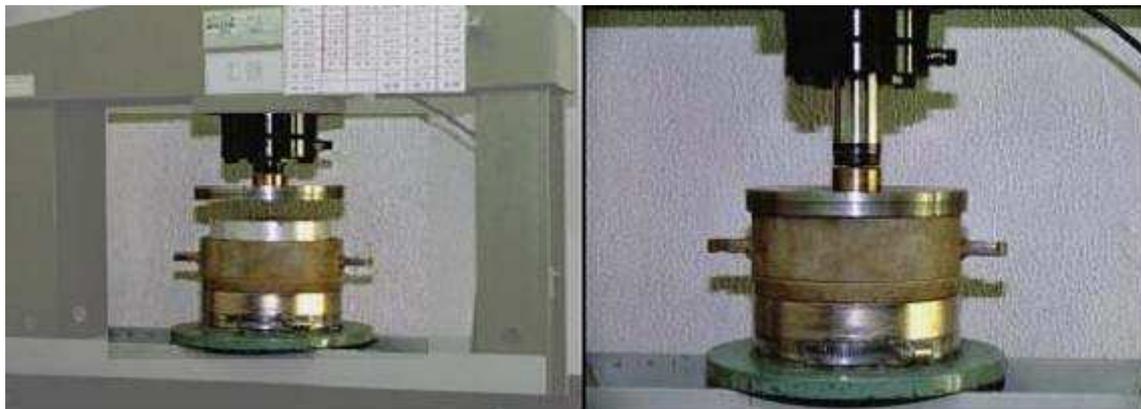


Figure 3.5 : Montage permettant le compactage des galettes de sol (avant et après compression)

3.1.4 Protocoles d'essai

Deux protocoles d'essai ont été mis en œuvre : un usuel, proposé par Hénensal et un nouveau que nous avons développé dans le but de mieux caractériser le phénomène d'érosion. Le principe de ces deux protocoles est cependant le même : laisser les jets impactés le sol à une certaine vitesse (ou une certaine pression) d'eau et recueillir les effluents (eau et sol érodé) en sortie de dispositif. Une fois ces effluents passés à l'étuve (Figure 3.6) la masse sèche recueillie permet de caractériser l'érosion pour la plage de temps et la force hydraulique appliquées.



Figure 3.6 : Séchage des effluents dans l'étuve

3.1.4.1 Protocole « Hénensal »

Selon le protocole proposé par Hénensal (Hénensal *et al.*, 1987), la sensibilité à l'érosion du sol est représentée par la masse érodée du sol à la pression de 1 bar (100 kPa) pendant 1 minute. Une seule mesure est effectuée au cours de l'essai et c'est la principale limite de ce protocole. En effet, ce résultat quantitatif mais unique ne permet pas de décrire finement la dynamique de l'érosion au cours du temps.

3.1.4.2 Nouveau protocole d'essai

Dans le cadre du présent travail, nous proposons donc un nouveau protocole d'essai où des mesures sont effectuées au cours du temps. Pour cela nous diminuons la pression dans la chambre d'eau de sorte à avoir un processus d'érosion plus lent. Les essais sont ainsi réalisés pendant 12 minutes continues à une pression de 0,2 bar (20 kPa) correspondant à une colonne d'eau de 2 mètres. Les effluents de l'essai sont recueillis à 1, 2, 4, 8 et 12 minutes.

Notons que, dans ce nouveau protocole, les jets ont toujours une vitesse moyenne relativement élevée (de l'ordre du mètre par seconde) et que l'impact reste très localisé au niveau des sillons d'érosion. Nous avons donc ici un phénomène qui reste « non-représentatif » de processus naturels tels qu'une pluie ou même un orage, par exemple. Cela s'avère cependant nécessaire pour caractériser les phénomènes d'érosion sur un temps « honnête » d'essai et c'est une contrainte générale des expérimentations *in situ*. Par ailleurs, soulignons que pour avoir une mesure de la sensibilité à l'érosion et notamment comparer différents sols entre eux, il suffit essentiellement d'avoir un essai identique (appareil et protocole) et le tester sur les différents types de sol, ce qui est le cas ici.

Les démarches détaillées du déclenchement, du suivi et de l'arrêt de l'essai sont présentées dans l'Annexe B.

3.2 RESULTATS EN LABORATOIRE

En laboratoire, les essais ont été réalisés sur différentes textures du sol selon les deux protocoles d'essai : protocole « Hénensal » et nouveau protocole proposé. Par ailleurs, la profondeur des rainures a également été mesurée à chaque palier d'essai à l'aide d'un réglet gradué. Les essais ont été réalisés avec un moule placé sur une petite pente de 10% (soit 6°).

Les textures du sol testées sont les mêmes que les essais de dispersion. Des essais préliminaires ont montré que la texture sableuse (texture 1), la texture limono-sableuse (texture 2) et la texture limono-argileuse (texture 3) s'érodent trop facilement et il a été décidé de réaliser des essais à l'EJM avec les cinq textures restantes (textures 4, 5, 6, 7, 8).

3.2.1 Résultats selon le protocole « Hénensal »

Selon ce protocole d'essai, le sol est attaqué par les jets d'eau à la pression de 1 bar (100kPa) soit un débit mesuré de 0,9 litre/minute (ou une vitesse en sortie de gicleur de 3 m/s) pendant une minute. La masse sèche érodée à la fin d'essai est utilisée pour classer la sensibilité à

l'érosion du type de sol. Le Tableau 3.1 présente le classement de sensibilité à l'érosion proposé par Hénensal.

Tableau 3.1 : Classement de sensibilité à l'érosion proposé par Hénensal

Masse érodée (g)	Classement
> 150	extrêmement érodable
50-150	très érodable
15-50	moyennement érodable
< 15	peu érodable

Tableau 3.2 : Résultats des essais à l'EJM des textures différentes du sol selon protocole Hénensal

No	Texture	Masse érodée à 1min. (g)	Classement
4	Sablo-argileuse	59	très érodable
5	Argilo-sableuse	48	moyennement érodable
6	Argilo-limoneuse	63	très érodable
7	Argileuse	20	moyennement érodable
8	Argileuse	non testée avec ce protocole	

Le Tableau 3.2 représente les résultats pour quatre textures de sol testées. Toutes les textures du sol sont classées « moyennement érodables » ou « très érodables ».

Comme nous l'avons déjà souligné, avec ce protocole, le classement de la sensibilité à l'érosion du sol se base sur une seule valeur et cela ne permet pas une caractérisation fine du phénomène d'érosion du sol. Remarquons notamment que trois des quatre textures testées se situent au niveau du seuil entre classifications « moyennement érodables » et « très érodables ».

Cependant, les résultats obtenus avec ce protocole peuvent être utilisés comme des valeurs préliminaires pour estimer la résistance du sol à l'érosion. Ils permettent également de comparer le protocole de type « Hénensal » au nouveau protocole proposé ici.

3.2.2 Résultats selon le nouveau protocole d'essai

Dans ce nouveau protocole d'essai, la masse sèche érodée du sol est recueillie à 1, 2, 4, 8 et 12 minutes. Par ailleurs, lors de ces essais, des mesures supplémentaires de la profondeur des différents sillons ont également été effectuées.

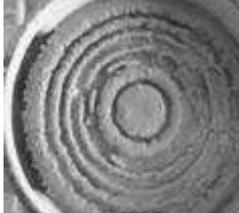
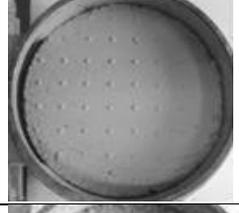
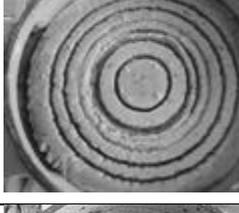
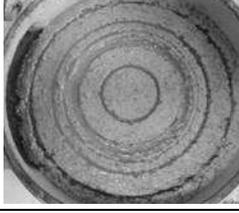
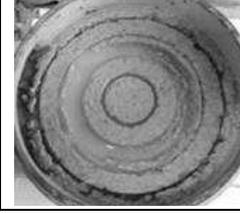
Nous présenterons ainsi, dans un premier temps, les observations visuelles des essais. Nous étudierons ensuite l'évolution temporelle de la masse sèche érodée qui constitue le résultat central des essais d'Erodimètre à Jets Mobiles. Nous verrons, enfin, comment les mesures supplémentaires de profondeurs des sillons réalisées dans cette étude particulière nous renseignent sur la dynamique du phénomène d'érosion imposé lors des essais.

3.2.2.1 Évolution de la surface du sol

Le Tableau 3.3 présente l'évolution de l'érosion sur la surface de l'échantillon des différentes textures du sol testées. Nous constatons que dès les premiers temps de l'érosion des sillons ou rainures sont formés. Leur profondeur et leur largeur croissent ensuite au cours de l'essai. Les

textures argileuses (textures 5, 6, 7, 8) préservent les rainures jusqu'à la fin d'essai tandis que les sillons de la texture sableuse (texture 4) s'effacent rapidement. Ces premières observations confirment, comme attendu, que la texture sableuse est bien plus sensible à l'érosion que la texture argileuse.

Tableau 3.3: Photos des essais à l'EJM des textures différentes du sol selon le nouveau protocole

Texture	0 minute	2 minutes	4 minutes	12 minutes
4 Sablo-argileuse				
5 Argilo-sableuse				
6 Argilo-limoneuse				
7 Argileuse				
8 Argileuse				

3.2.2.2 Evolution de la masse érodée et taux d'érosion

La Figure 3.7 représente la masse érodée cumulée des différents essais au cours du temps. Pour les différentes textures, cette masse croit de manière sensiblement linéaire excepté pour le sol sablo-argileux (texture 4). La pente initiale la plus forte est celle de la texture 4, la pente la plus faible est celle de la texture 8. Nous pouvons en conclure (et cela semble assez intuitif) que les sols les plus argileux présentent une plus grande résistance initiale à l'érosion que le sol sableux (texture 4).

Comparons les sols sablo-argileux (texture 4) et argilo-limoneux (texture 6) selon les deux protocoles d'essais. Selon le protocole « Hénensal » les deux textures présentent une sensibilité à l'érosion très voisine (Tableau 3.2). Selon le nouveau protocole d'essai, la masse érodée à 12 minutes est également similaire. Ces deux observations peuvent être d'ailleurs rapprochées. Cependant la Figure 3.7 nous montre que la dynamique d'érosion est très différente pour les deux textures et que cette première similarité n'est qu'apparente. Ainsi l'érosion initiale est bien plus importante pour la texture la plus sableuse ce qui permet de retrouver le sens commun. Ce simple exemple montre ainsi que la nouvelle approche permet d'avoir une caractérisation bien plus fine des phénomènes.

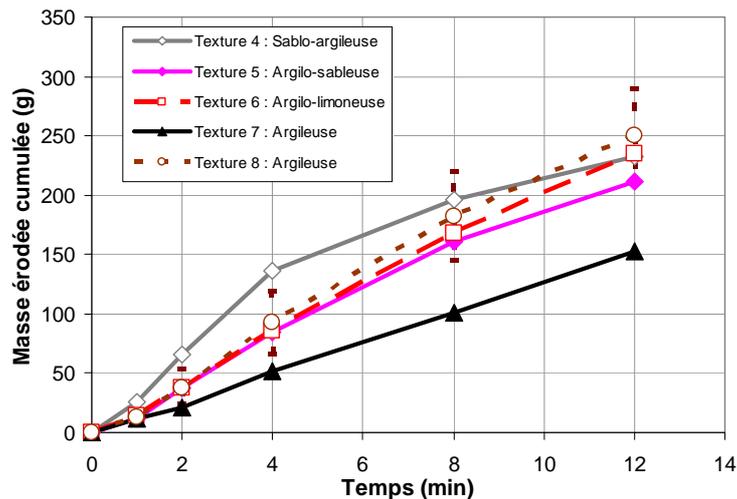


Figure 3.7 : Masse érodée des différentes textures de sol avec l'érodimètre à jets mobiles

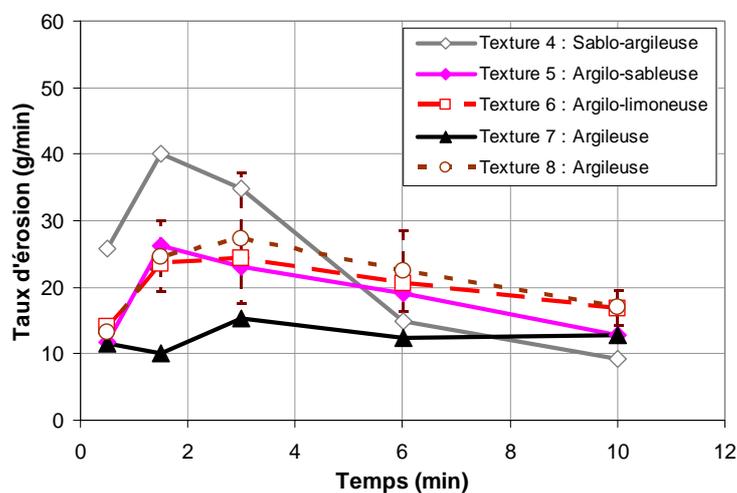


Figure 3.8 : Taux d'érosion des différentes textures de sol

La Figure 3.8 représente le taux d'érosion des différents essais au cours du temps. Ce taux correspond à la masse érodée pour chaque palier divisée par la durée de ce palier. C'est la pente des courbes de masse érodée (Figure 3.7) entre chaque mesure. Cette courbe permet de présenter la variation de sensibilité à l'érosion de chaque échantillon au cours du temps.

Les courbes pour différentes textures présentent le même type d'évolution : d'abord une brève phase de croissance qui correspond à l'initiation de l'érosion : formation des sillons et

« inondation » de la chambre de pluie ; puis une phase décroissante qui correspond à la perte d'efficacité de l'érosion par les jets. Dans cette deuxième phase, en effet, les sillons s'approfondissent et s'élargissent et les jets impactant exercent de moins en moins de contrainte sur le bord du sillon provoquant la diminution du taux d'érosion.

Nous observons, Figure 3.7 et Figure 3.8, des comportements assez similaires pour les différentes textures.

Le sol sablo-argileux (texture 4) s'érode très facilement en début d'essai puis l'efficacité de l'érosion diminue nettement. Cela correspond bien avec l'observation de disparition des sillons que nous pouvons constater Tableau 3.3. Parmi les sols testés, le sol argileux (texture 7) est le moins sensible à l'érosion tandis que les sols argilo-sableux (texture 5), argilo-limoneux (texture 6), et argileux (texture 8) semblent avoir une sensibilité à l'érosion comparable et intermédiaire.

Remarquons pour finir que la différence de sensibilité à l'érosion entre les textures 5-6 et la texture 7 est également détectable avec le protocole « Hénensal » alors que ce n'est pas le cas entre les textures 5-6 et la texture 4 qui présentent pourtant une dynamique d'érosion bien différente.

3.2.2.3 Dynamique d'érosion

Dans la perspective de remonter à des lois d'érosion telles celles décrites dans le Chapitre 1 (taux d'érosion en fonction de contrainte de cisaillement), il convient de comprendre ce qui se passe au niveau des sillons. Nous observons, en effet, Tableau 3.3, qu'au moins dans un premier temps (sinon pour la totalité de l'essai), l'érosion se fait sous forme de rainure localisée au passage des jets. Nous nous sommes ainsi intéressés au profil temporel des rainures, en relevant la profondeur des sillons pour les différents paliers de mesure.

Dans les paragraphes suivants, nous nous intéresserons d'abord à caractériser la dynamique « intrinsèque » et locale des rainures avant de poursuivre sur le lien avec la masse érodée (mesure globale) et de conclure sur la perspective de trouver une loi d'érosion.

Evolution de la profondeur des rainures

La surface de l'échantillon est érodée selon six rainures créées par les six jets d'eau. Comme la distance de chaque jet d'eau au centre de l'échantillon est différente, le temps que les jets passent sur chaque sillon est également différent. Il est ainsi possible d'observer, Tableau 3.3, que les rainures les plus au centre sont les plus érodées. C'est en effet ces rainures qui subissent l'érosion la plus importante car les jets y sont passés le plus longtemps. Ceci s'accorde bien avec les résultats des travaux d'Atmatzidis et Ferrin (1983) malgré la différence des pressions utilisées.

Les six rainures ayant pour rayon R_i (i variant de 1 à 6), nous notons $p_i(t)$ la profondeur de la rainure i au moment t . Si nous notons d le diamètre « efficace » des jets, le temps caractéristique t_{ca} passé sur chaque rainure i par le jet est évalué selon la formule suivante :

$$t_{ca} = \frac{d}{2 \times \pi \times R_i} t$$

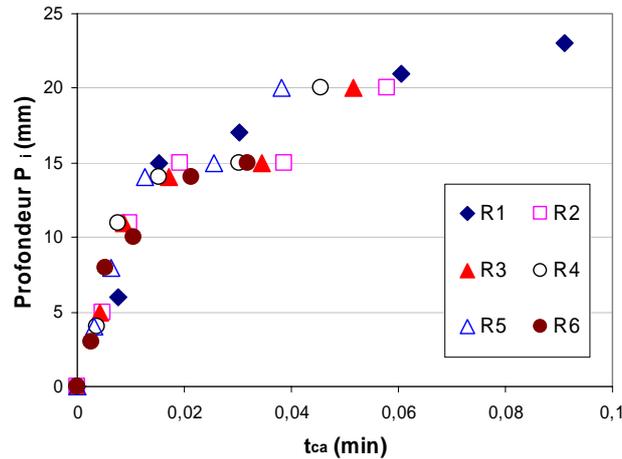


Figure 3.9 : Relation entre la profondeur des rainures et le temps caractéristique des jets pour la texture 8 argileuse

La Figure 3.9 représente, pour la texture 8, l'évolution des profondeurs mesurées en fonction du temps caractéristique pour les 6 sillons ($R_1 = 21\text{mm}$, $R_2 = 33\text{mm}$, $R_3 = 37\text{mm}$, $R_4 = 42\text{mm}$, $R_5 = 50\text{mm}$, $R_6 = 60\text{mm}$). Nous remarquons que les données se replacent sur une seule courbe. Cette courbe caractérise donc l'évolution hypothétique de la profondeur d'un sillon sous l'action continue du jet au cours du temps t_{ca} . Elle représente donc la dynamique d'érosion caractéristique de la texture de sol considérée.

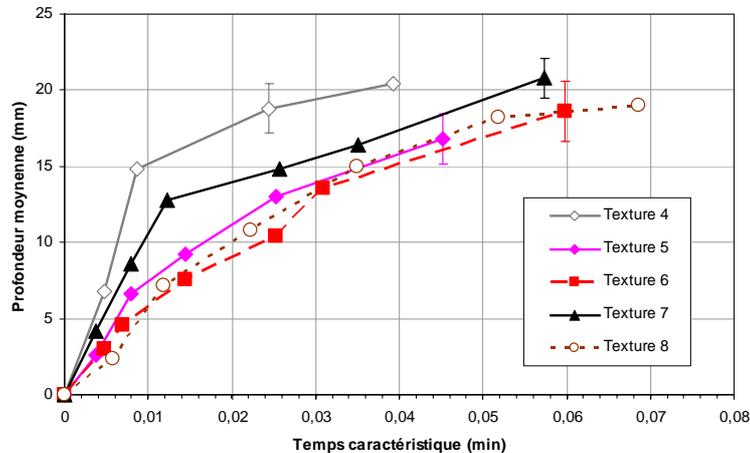


Figure 3.10 : Profondeur moyenne des rainures avec le temps caractéristique pour les différentes textures (seuls quelques écart-types représentatifs sont indiqués)

La Figure 3.10 représente l'évolution de la profondeur moyenne pour les différentes textures de sol. La profondeur de la rainure augmente d'abord rapidement puis plus lentement avec les temps. Cela correspond à une diminution de l'efficacité de l'érosion au cours du temps, lorsque les sillons sont creusés. Remarquons que le ralentissement au cours du temps de la croissance de la profondeur ne signifie pas pour autant la diminution du taux d'érosion. En effet la surface accessible au jet dans le sillon augmente quand la profondeur augmente et le taux d'érosion global peut donc rester sensiblement constant.

Pour la texture sablo-argileuse (texture 4), la profondeur des rainures semble arriver à saturation alors que ce n'est pas le cas des autres textures.

Il n'y a sensiblement pas de différence au niveau de l'évolution de la profondeur des rainures pour les textures 5, 6 et 8 alors que les textures 4 et 7 se différencient. Cela peut être rapproché de l'observation macroscopique faite précédemment sur les taux d'érosion (Figure 3.8). Il existe donc une corrélation entre dynamique d'érosion au niveau des rainures (échelle locale) et mesure de masse érodée (échelle globale) que nous allons analyser plus en détails.

Evolution de la largeur de la rainure

De manière à relier la masse érodée au creusement des sillons, il nous faut maintenant nous intéresser au profil du sillon. Comme il ne nous est pas accessible avec la seule mesure de profondeur, nous envisageons pour le moment deux profils types ayant une forme triangulaire : soit une largeur constante de taille l (Figure 3.11a), soit une largeur variable $l(t)$ proportionnelle à la profondeur $p(t)$ (Figure 3.11b).

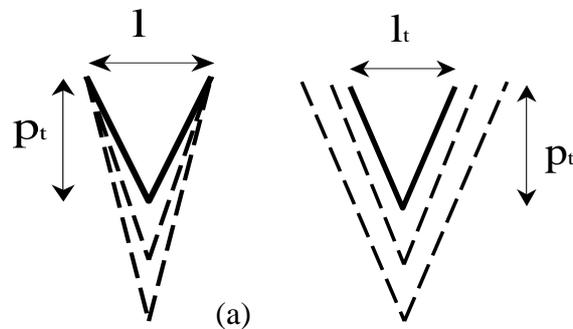


Figure 3.11 : Deux hypothèses pour l'évolution de la largeur de la rainure : (a) largeur constante, (b) largeur croissante et proportionnelle à la profondeur

On cherche la corrélation entre la masse érodée mesurée et la masse calculée selon le volume des rainures supposées dans les deux cas.

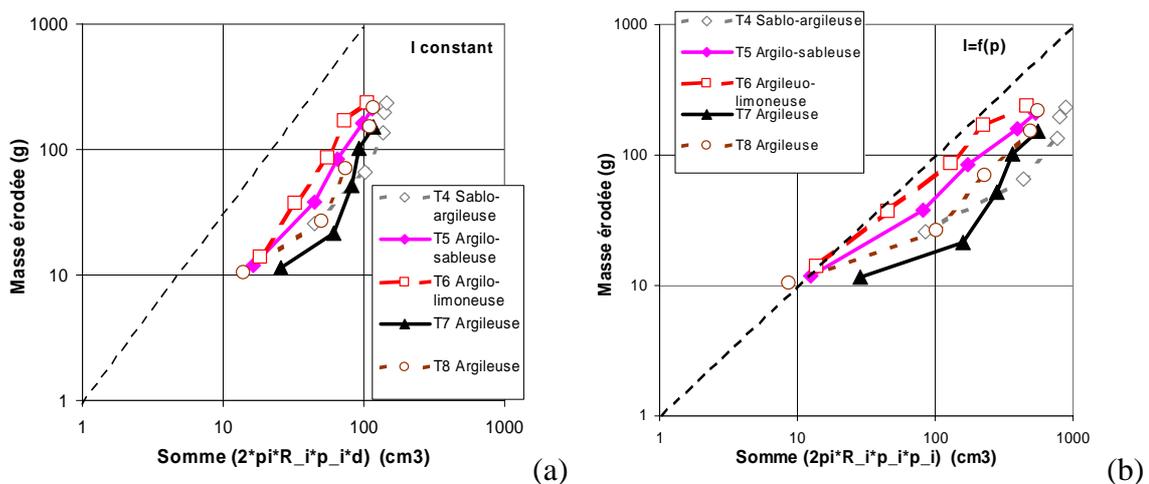


Figure 3.12 : Comparaison entre les deux hypothèses de l'évolution de la largeur de la rainure : (a) largeur constante, (b) largeur proportionnelle à la profondeur

Le volume total calculé selon les deux hypothèses s'exprime selon :

- largeur l constant (soit $l = d = 1\text{mm}$): $V = \sum_{i=1}^6 \frac{2 \times \pi \times R_i \times p_i \times d}{2}$,

- largeur l proportionnelle à la profondeur p (soit $l = \alpha \times p$): $V = \alpha \sum_{i=1}^6 \frac{2 \times \pi \times R_i \times p_i^2}{2}$.

Considérant la Figure 3.12, nous constatons que la proportionnalité entre masse érodée et volume estimé est avérée dans la seconde hypothèse (pente de 1 en échelle log-log) alors que ce n'est pas le cas selon la première hypothèse. Nous en concluons donc que la largeur est vraisemblablement proportionnelle à la profondeur de la rainure.

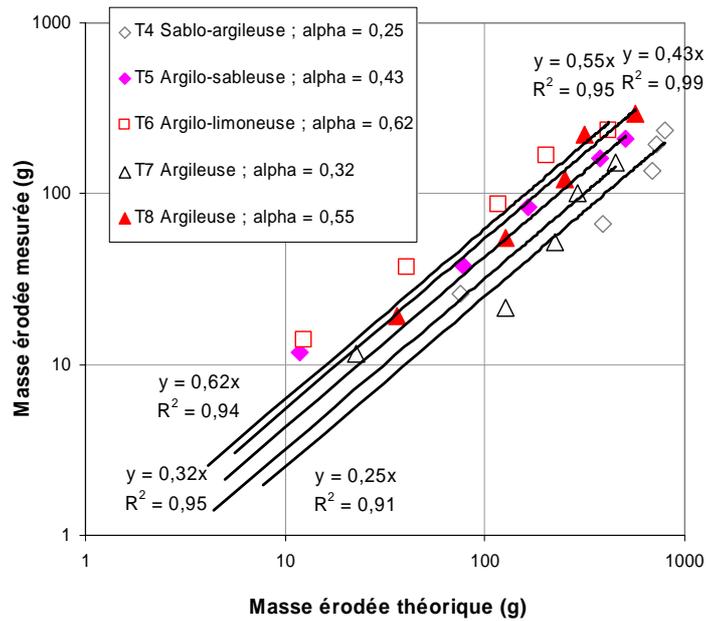


Figure 3.13 : Corrélation entre la masse mesurée et la masse théorique pour les textures

Le profil de la figure Figure 3.11b fait apparaître un coefficient de proportionnalité entre la largeur et la profondeur que nous notons $\alpha = l / p$. Ce coefficient peut dépendre de la texture du sol. Pour l'évaluer, nous écrivons que la masse érodée théorique m_{th} s'écrit dans ce modèle :

$$m_{th} = \alpha \times \rho \times \sum \frac{2 \times \pi \times R_i \times p_i \times p_i}{2},$$

où ρ est la masse volumique du sol.

Sur la Figure 3.13, nous avons obtenu une corrélation entre la masse érodée réelle et la masse théorique. Le coefficient α varie de 0,3 à 0,6. Si nous prenons la valeur moyenne $\alpha \approx 0,5$ nous obtenons la corrélation de la Figure 3.14 qui est relativement bien vérifiée pour l'ensemble des textures considérées.

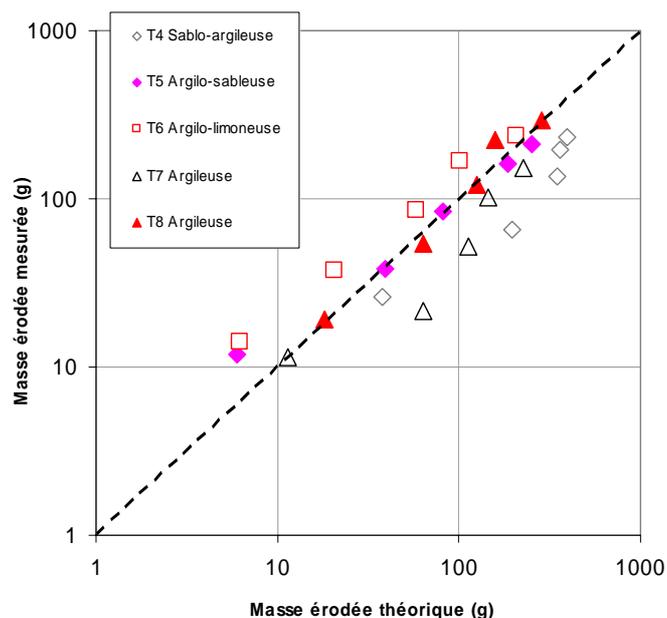


Figure 3.14 : Corrélation entre la masse mesurée et la masse théorique pour les textures ($\alpha=0,5$)

Notons, pour finir, que, dans le cadre de cette étude, des profils d'allures plus (ou moins) complexes peuvent également être envisagés. Les deux cas détaillés Figure 3.11 se réfèrent alors à un profil évoluant de façon similaire dans le temps soit selon les deux axes (cas b) soit seulement selon la verticale (cas a). La « complexité » du profil étant alors simplement contenue dans le coefficient α .

Pour aller plus loin dans le modèle

De sorte à remonter à une loi d'érosion, c'est à dire à une loi liant le taux d'érosion à la contrainte de cisaillement exercée sur le sillon, il conviendrait ensuite de considérer un écoulement typique dans le profil de la Figure 3.11b. C'est une étape qui n'a, pour le moment, pas été réalisée. Différentes possibilités sont cependant d'ores et déjà envisageables ou à exclure. Il paraît ainsi évident que le profil recherché n'est pas du type visqueux, le nombre de Reynolds typique étant de l'ordre de plusieurs milliers (vitesse typique 2m/s, taille typique 2mm).

3.2.2.4 Conclusion

Les essais en laboratoire menés avec le protocole « Hénensal » et avec notre nouveau protocole ont permis de mettre en évidence la pertinence de ce dernier protocole. La réduction du débit nous a permis de mesurer la masse érodée au cours du temps et d'accéder à une dynamique plus fine du processus d'érosion. Le nouveau protocole nous permet notamment de distinguer des sensibilités différentes à l'érosion pour des textures de sol de caractéristiques semblables selon le protocole « Hénensal ».

L'étude fine de la profondeur des sillons nous a, quand à elle, permis de poser les premiers éléments d'une modélisation de l'essai dans le but de le relier aux lois d'érosion traditionnellement utilisées (voir Chapitre 1).

Pour valider l'essai, il faut également le confronter au terrain. C'est l'objet des paragraphes suivant.

3.3 RESULTATS IN SITU

Les essais d'érosion externe avec l'Erodimètre à Jets Mobiles in situ ont été menés en deux campagnes. La première campagne, sur un remblai à Montoire-sur-le-Loir dans le Loir et Cher (41), a permis de mettre pour la première fois en œuvre le nouveau protocole et la seconde, réalisée sur des sols agricoles dans la Somme (80) et dans l'Aisne (02), a permis de s'assurer de la pertinence des mesures.

3.3.1 Essai sur un remblai

3.3.1.1 Contexte et objectifs

La campagne d'essais sur le site de la culée de pont de Montoire-sur-le-Loir a été effectuée avec le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois en mars 2007. L'ouvrage construit sert à la déviation de la route départementale RD917 (Figure 3.15). Une branche du Loir passe à côté de l'ouvrage en remblai (Figure 3.16). Il existe une période de janvier à mars (voire avril) où l'ouvrage est inondé, le niveau des plus hautes eaux atteignant environ 4 mètres.

Le but de cette campagne était, outre l'évaluation de la résistance à érosion hydrique du remblai, de tester pour la première fois l'essai dans les contraintes que peut apporter le terrain.

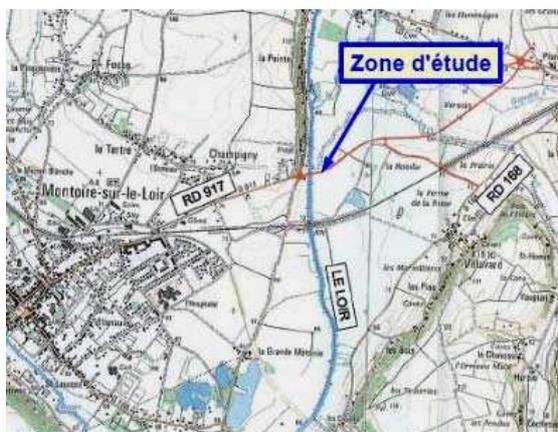


Figure 3.15 : Plan de situation du remblai



Figure 3.16 : Photo du remblai prise sur sa crête et un essai en cours sur le talus

3.3.1.2 Résultats

Des essais avec le protocole d'Hénensal ont été effectués sur la tête (pente $i = 0\%$, angle $\alpha = 0^\circ$) et sur le talus du remblai ($i = 90\%$, $\alpha = 42^\circ$). Cinq essais de répétabilité ont été effectués pour chaque position. Les résultats sont présentés Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Résultats des essais à l'EJM sur le remblai selon le protocole Hénensal

Position		Masse érodée en grammes	Classement
Tête	$\alpha = 0^\circ$	27 ± 6	moyennement érodable
Talus	$\alpha = 42^\circ$	226 ± 70	extrêmement érodable

D'après le classement d'Hénensal (Hénensal et Duchatel, 1990), le sol à la tête du remblai correspond à un sol moyennement érodable. Le sol au talus correspond à un sol extrêmement érodable. Nous pouvons relier ces résultats d'une part à l'influence de la pente sur la dynamique d'érosion (Hénensal et Duchatel, 1990), d'autre part à la compacité du sol. Nous avons remarqué, en effet, que le sol sur la tête du remblai était bien compacté tandis que le sol sur le talus était plus lâche ce qui mène naturellement à une érodabilité plus importante.

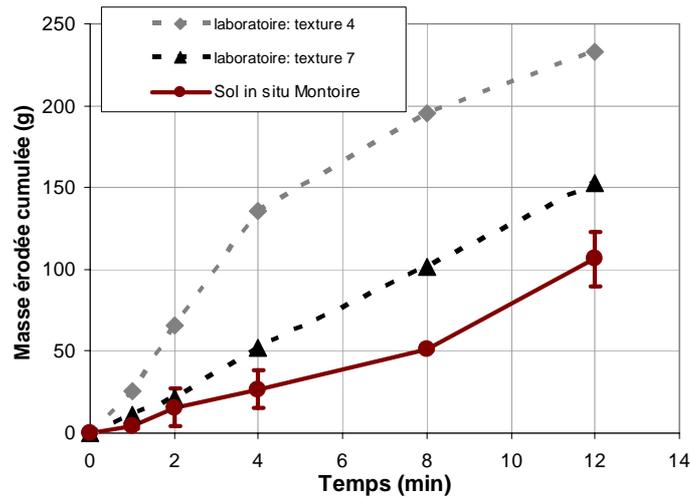


Figure 3.17 : Masse érodée du sol sur la tête du remblai selon le nouveau protocole

La Figure 3.17 représente le résultat des essais sur la tête du remblai selon notre nouveau protocole d'essai, les deux courbes extrêmes des textures de référence (4 et 7) sont également représentées. Nous constatons que bien que la caractérisation de l'érosion selon le protocole « Hénensal » soit voisine de la texture 7 (20g selon le Tableau 3.2) l'érosion du sol suivie sur sa durée avec le nouveau protocole diffère cependant sensiblement.

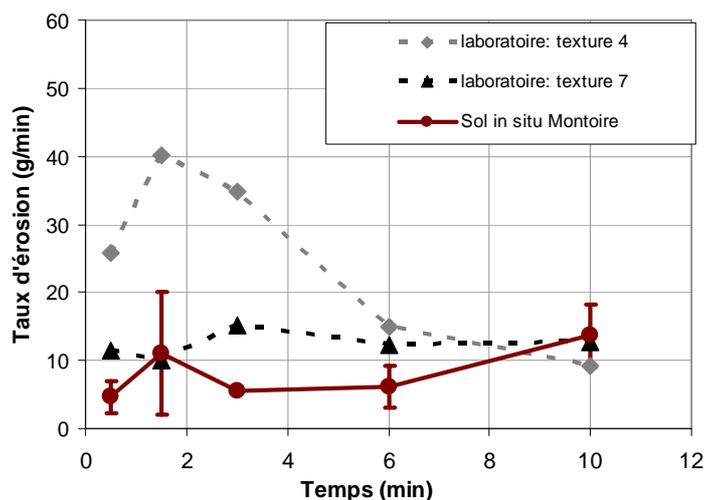


Figure 3.18 : Taux d'érosion du sol sur la tête du remblai selon le nouveau protocole

La Figure 3.18 représente le taux d'érosion évalué à la tête du remblai. Comparé aux textures de références en laboratoire et similairement à la Figure 3.17, ce taux est plutôt faible.

Les caractéristiques du sol de Montoire-sur-le-Loir sont données en annexe et permettent d'expliquer en partie cette sensibilité à l'érosion plus faible.

En premier lieu, notons que la granulométrie du sol est bien plus fine : il y a plus de 50% de particules de taille inférieure à $2\mu\text{m}$ contre moins de 30% pour l'ensemble des textures testées en laboratoire. Cette proportion de particules fines est un des facteurs connus de la résistance à l'érosion (voir en particulier le Chapitre 4 suivant).

Par ailleurs, l'analyse de la composante argileuse montre une forte présence de Montmorillonite. Or cette argile, réputée gonflante, résiste particulièrement au phénomène d'érosion, comme nous le verrons au Chapitre 4 mais aussi aux phénomènes de dispersion comme nous le montrerons au Chapitre 5. Il est donc consistant de trouver une sensibilité plus faible à l'érosion ce que masquait les résultats avec le Protocole « Hénensal ».

Pour finir, notons que les résultats présentés ici peuvent être soumis à quelques réserves, notamment l'augmentation du taux d'érosion en fin d'essai. Cela est vraisemblablement lié à des problèmes de mise en œuvre de ces premiers essais mais il n'est pas non plus à exclure que la montmorillonite présente perturbe l'essai.

3.3.1.3 Conclusion

Les essais à l'Erodimètre à Jets Mobiles sur le site de Montoire-sur-le-Loir nous ont permis de mettre en œuvre le nouveau protocole in situ. Malgré le nombre relativement limité d'essais pratiqués (le talus n'a pu être testé avec le nouveau protocole lors de cette campagne), la campagne d'essais nous a permis à la fois de tracer quelques conclusions sur la résistance à l'érosion du remblai et de souligner la pertinence de notre nouveau protocole au niveau faisabilité. Nous avons notamment pu montrer que le protocole « Hénensal » ne détectait pas de sensibilité différente à l'érosion entre le sol du remblai et la texture 7 des essais en laboratoire alors que, de part les caractéristiques du sol, le « bon sens » indiquerait une sensibilité à l'érosion du sol du remblai bien plus faible. C'est en partie ce qui d'ores et déjà détecté avec cette première campagne avec le nouveau protocole d'essai.

3.3.2 Essais sur des sols agricoles

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a été contacté en 2007 par une société spécialisée dans les traitements de sols agricoles dans le but de caractériser l'efficacité de différents produits dans la lutte contre l'érosion. Pour cela des essais à l'Erodimètre à Jets mobiles ont été réalisés sur des parcelles agricoles dans la Somme (80) et dans l'Aisne (02). Les mesures et les conclusions portées lors de ces essais ont également permis de valider notre nouveau protocole de mesure.

3.3.2.1 Contexte et objectifs

La société fabrique des produits minéraux spécialement dédiés à l'amélioration du fonctionnement des micro-organismes et des tissus vivants. L'objectif est l'amélioration de la fertilité globale du sol d'un point de vue biologique, physique et chimique.

L'objectif du programme expérimental a été de mesurer et d'analyser l'effet des produits de traitement sur le comportement à l'érosion de plusieurs échantillons de sols en situation de production. Deux sites comportant des parcelles d'essais ont été utilisés (terrain typique en Figure 3.19) et l'utilisation de trois types de traitement a été comparée.

Remarquons que pour l'étude des effets de l'érosion sur les ouvrages de type remblai d'infrastructures routières ou ferroviaires, le processus de mise en œuvre de ces ouvrages peut être facilement reproduit en laboratoire selon le protocole Proctor et permet donc d'envisager une étude paramétrique.

Ce n'est pas le cas de la présente étude et seuls des essais in situ ont été possibles. En effet, outre l'action spécifique de la météo, les sols agricoles subissent différents traitements mécaniques avec des outils comme les herseurs qui ne peuvent être reproduits aisément à une aussi petite échelle que le moule Proctor. Nous avons donc répété les essais sur le terrain de manière systématique afin de pouvoir analyser les informations acquises et les traiter statistiquement.



Figure 3.19 : Photo des parcelles agricoles

3.3.2.2 Réalisation des essais

Protocole d'essai

La première étape du protocole d'essai est de préparer le sol : enlèvement des agrégats et matières végétales de surface, et à le rendre plan et horizontal (Figure 3.20a). Cette étape est indispensable ici car les restes de végétaux en surface perturbent la mesure. A noter que si l'essai a pour objectif de tester un sol végétalisé, cette étape n'est plus requise.

La trousse coupante est enfoncée de manière à amener le déversoir dans le plan de la zone testée et au-dessus du récipient de recueil. L'érodeur est ensuite placé sur la trousse coupante et il est branché à la source d'eau sous pression (Figure 3.20b). Le mode opératoire choisi est alors réalisé. L'ensemble du dispositif est placé à l'horizontale (i.e. pente nulle).

Les essais ont été réalisés selon le protocole Hénensal et notre nouveau protocole. Un exemple d'essai en cours est présenté sur la Figure 3.21 avec les flacons de recueil d'effluents selon notre nouveau protocole.

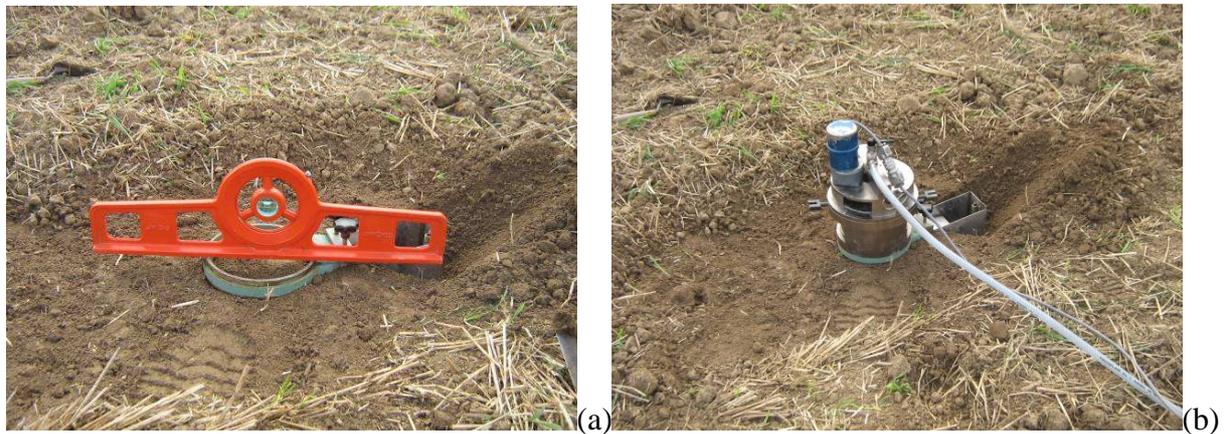


Figure 3.20 : Appareillage et préparation de l'essai : a) mise en place de la trousse coupante et du déversoir, b) mise en place de l'érodimètre.

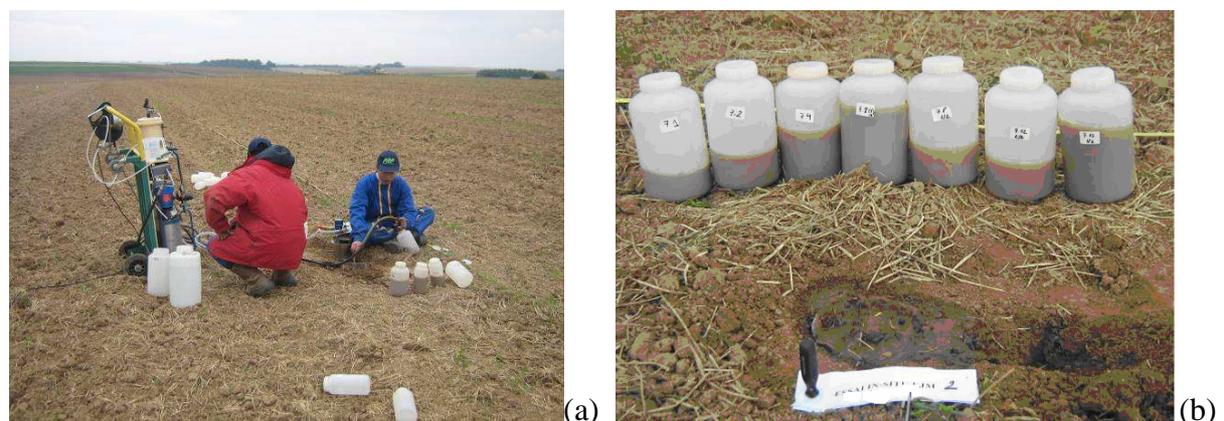


Figure 3.21 : (a) Essai en cours de réalisation, (b) récipients avec effluents après essai (site 1)

Présentation des sites

Sur les deux sites considérés, le terrain est constitué de parcelles élémentaires ayant reçu trois traitements différents pendant plusieurs années : Traitement 1 (T1), Traitement 2 (T2) et Traitement 3 (T3), l'un des traitements étant, en fait, l'absence de traitement physico-chimique (parcelle témoin). Les parcelles sont rectangulaires de largeur et de longueur décamétriques.

Au bilan, les essais ont été ainsi réalisés sur trois types de parcelles (avec traitements notés 'T1', 'T2' et 'T3') et en deux lieux différents (notés 'site 1' et 'site 2') selon le protocole Hénensal et notre nouveau protocole.

Résultats bruts des essais

L'ensemble des résultats des essais effectués avec le nouveau protocole est présenté sur la Figure 3.22 pour le site noté 1 et sur la Figure 3.23 pour le site noté 2.

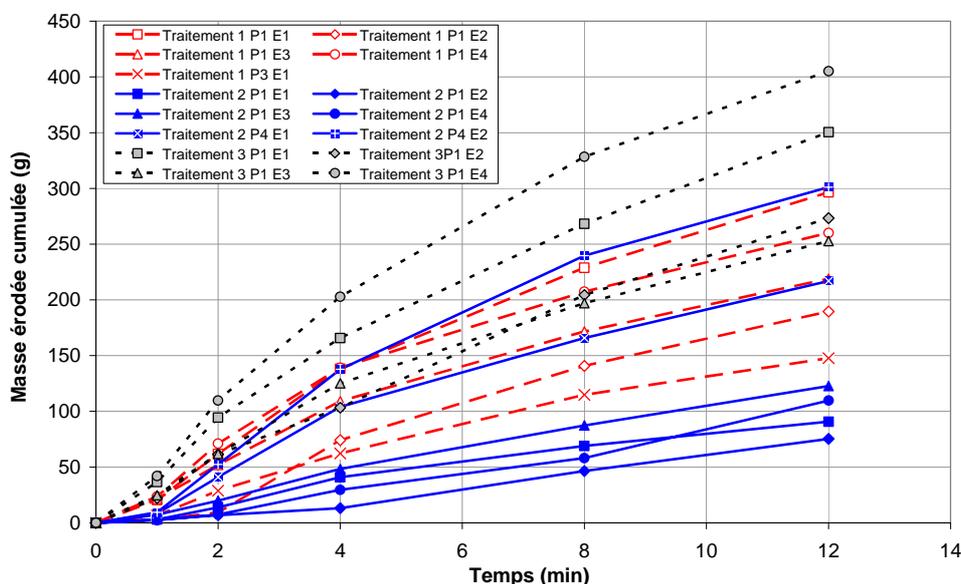


Figure 3.22 : Résultats des essais effectués sur le site 1

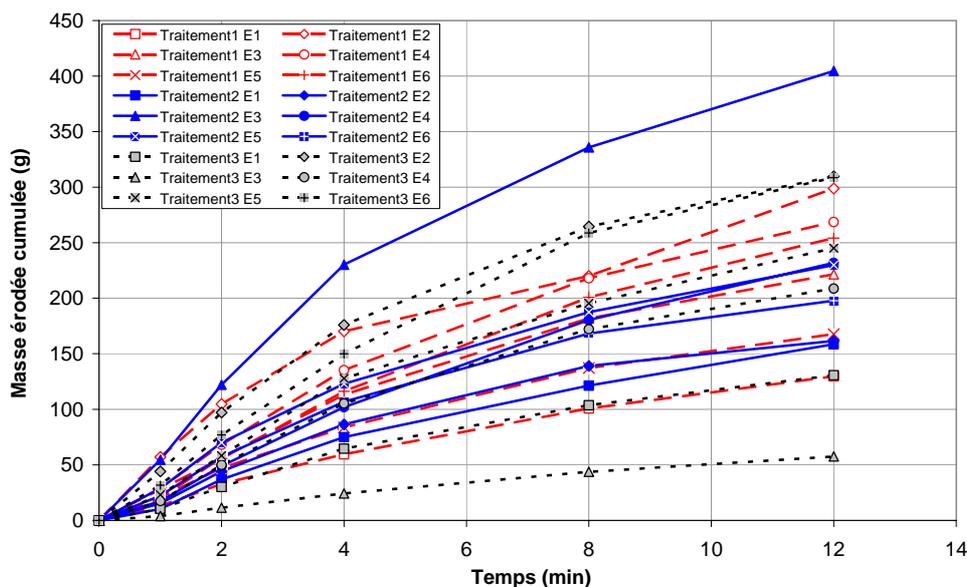


Figure 3.23 : Résultats des essais effectués sur le site 2

3.3.2.3 Synthèse des résultats

Résultats selon le protocole « Hénensal »

Nous avons obtenu, pour les différentes parcelles des deux sites, les valeurs données dans le Tableau 3.5.

Remarquons que selon la définition proposée par Hénensal, l'érodabilité d'un sol correspond à la perte en grammes que ce sol subit au cours d'un essai d'érosion avec une pente de 6 degrés (soit 10%), après que ce sol ait été compacté à l'optimum Proctor et maintenu à la teneur en eau optimum Proctor. Nous considérons ici une extension de cette définition pour une mesure in situ à l'horizontale.

Tableau 3.5 : Résultats des essais à l'EJM sur les sols agricoles selon le protocole « Hénensal »

Site	Parcelle	Masse érodée en grammes	Classement d'érodabilité
1	T1	121	très érodable
	T2	101	très érodable
	T3	100	très érodable
2	T1	77±8	très érodable
	T2	137	très érodable
	T3	191	extrêmement érodable

D'après le classement de Hénensal et Duchatel (1990), les différents sols traités (sauf T3 du site 2) correspondent tous à des sols très érodables. Il est cependant difficile de caractériser plus avant l'érodabilité des différents sols testés d'abord car le nombre d'essais (1 seul ou 2) est potentiellement insuffisant mais surtout car ce type de protocole (pression d'air importante entraînant une sollicitation extrême) ne semble pas à même de rendre compte suffisamment précisément de l'érodabilité des sols de surface ou agricoles. Notre nouveau protocole est

dans ce cas plus adapté car il utilise une pression d'air (et donc un débit d'eau) plus faible et permet, en outre, de suivre l'érosion au cours du temps et d'avoir des points de mesure supplémentaires.

Résultats selon notre nouveau protocole

Nous représentons dans cette partie, non plus les masses érodées de tous les essais mais la moyenne de la masse érodée pour chaque type de traitement ainsi que l'écart type (Figure 3.24 et Figure 3.25).

Notons que dans la présente étude les sols testés sont fortement hétérogènes, ayant reçu des traitements mécaniques qui peuvent induire une variabilité spatiale à différentes échelles : du centimètre (taille des outils) au mètre (taille des machines agricoles). L'écart-type des données représente dans ce cas une mesure de l'hétérogénéité, de la variabilité du sol plus qu'une incertitude sur la mesure. Nous pouvons, en outre, relever que les valeurs moyennes typiques sont de l'ordre de celles mesurées au laboratoire alors que les essais effectués avec le protocole « Hénensal » donnent un écart plus important.

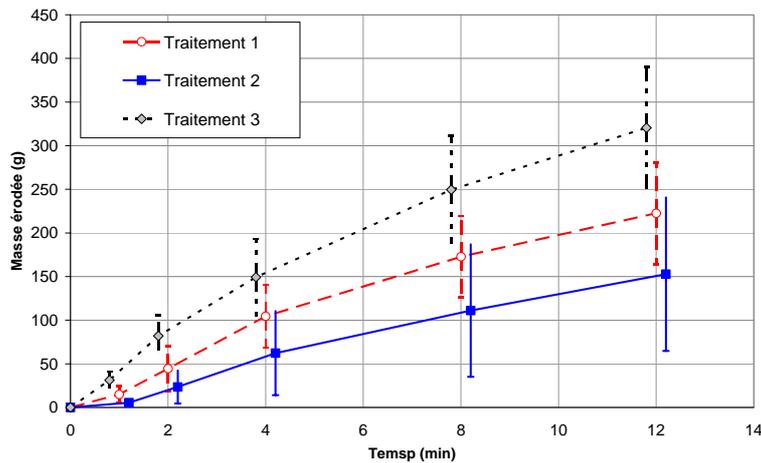


Figure 3.24 : Résultat des essais d'érodimétrie selon notre nouveau protocole pour le site 1

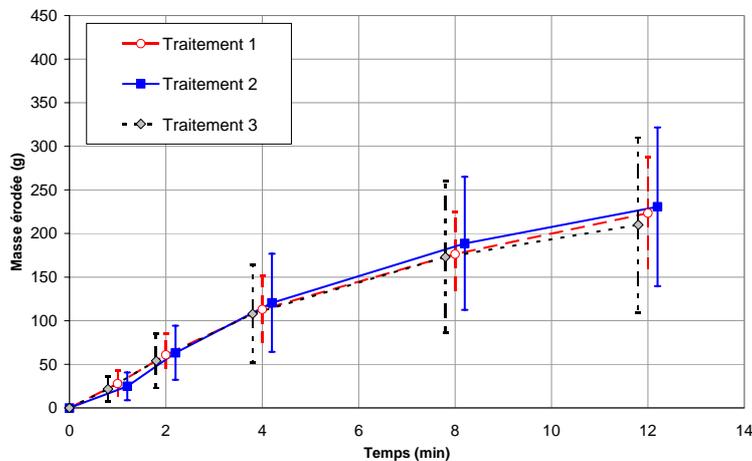


Figure 3.25 : Résultat des essais d'érodimétrie selon notre nouveau protocole pour le site 2

Remarquons que le processus d'érosion est « continu » : si la première mesure réalisée selon notre nouveau protocole caractérise un sol plus (ou moins) sensible à l'érosion, cette observation reste valable pour les différentes mesures réalisées ultérieurement. Cela valide la pertinence de ce protocole à mesurer le taux d'érosion d'un sol pour un débit et une pression donnée.

Nous constatons, à partir de la Figure 3.24 et de la Figure 3.25, que les deux sites donnent des résultats sensiblement différents. Sur le site 1, les différents traitements appliqués au sol semblent statistiquement conduire à une variation de sensibilité à l'érosion (i.e. un classement des sols). Cette variation est confirmée par la cohérence des résultats entre les différents moments de mesures. Ainsi, malgré l'incertitude importante sur les résultats, il y aurait une variation de sensibilité à l'érosion entre les différents traitements : le procédé T2 paraît dans ce cas être le plus favorable.

Au contraire de ces observations, pour le site 2, il ne semble pas exister de différence statistique notable (Figure 3.25) : quelque soit le type de traitement et aux barres d'erreur près, les résultats sont similaires.

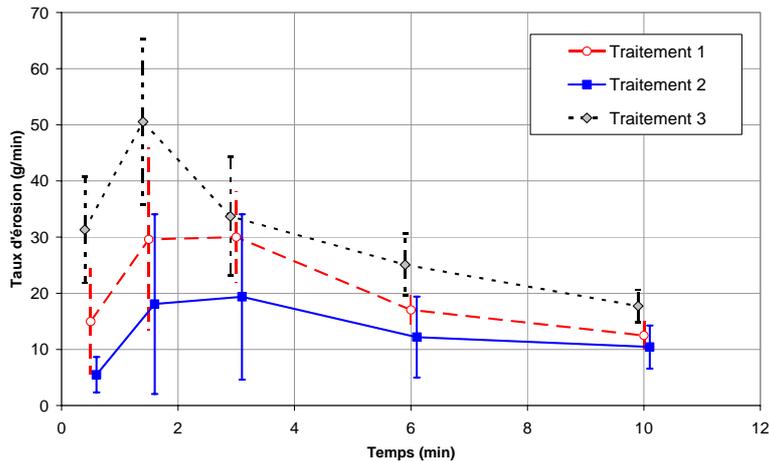


Figure 3.26 : Taux d'érosion du sol pour le site 1

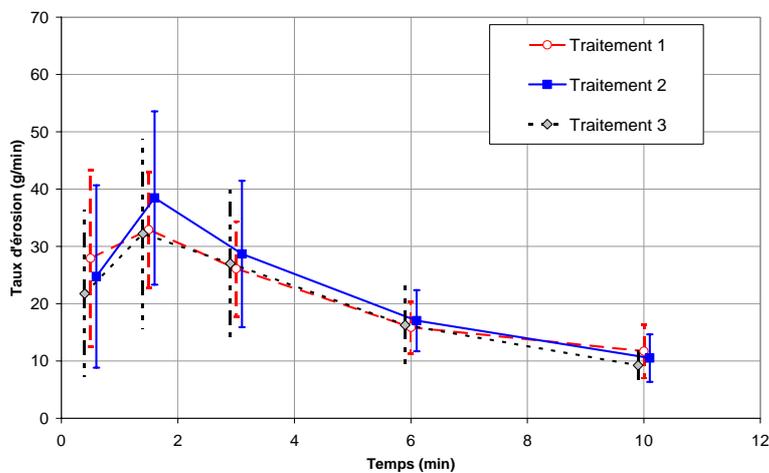


Figure 3.27 : Taux d'érosion du sol pour le site 2

La Figure 3.26 et la Figure 3.27 présentent le taux d'érosion du sol pour les deux sites. La vitesse d'érosion augmente dans les premières minutes puis diminue progressivement jusqu'à la fin d'essai en accord avec les observations déjà faites en laboratoire. La décroissance observée à la fin de l'essai peut être imputée à la profondeur croissante des sillons créés par les jets qui dans la configuration horizontale finissent par retenir les particules arrachées.

Pour le site 2, il n'y a pas de différence importante du taux d'érosion entre les méthodes de traitements. Par contre pour le site 1, on peut constater que la vitesse d'érosion diffère d'une méthode à l'autre : le sol avec le procédé T2 s'érode plus lentement alors le sol avec le procédé T3 semble s'éroder le plus rapidement comme cela était apparu Figure 3.24 et Figure 3.25.

Analyse des résultats

Les observations réalisées sur les essais selon le protocole Hénensal sont trop peu nombreuses, statistiquement peu fiables et donc difficilement exploitables comme nous avons pu le constater précédemment. Elles se révèlent également difficilement corrélables avec les essais menés avec notre nouveau protocole et qui se révèlent exploitables. En effet ils montrent clairement que selon le lieu considéré (site 1 ou site 2), il y a ou il n'y a pas de différences de sensibilité à l'érosion entre les différents traitements. Pour expliquer ces observations qui peuvent être surprenantes, avançons quelques pistes de réflexion.

Des analyses granulométriques partielles (pour le passant à 80 μ m) ont été réalisées selon la méthode de la sédimentométrie en présence de défloculant. Les résultats sont présentés Figure 3.28.

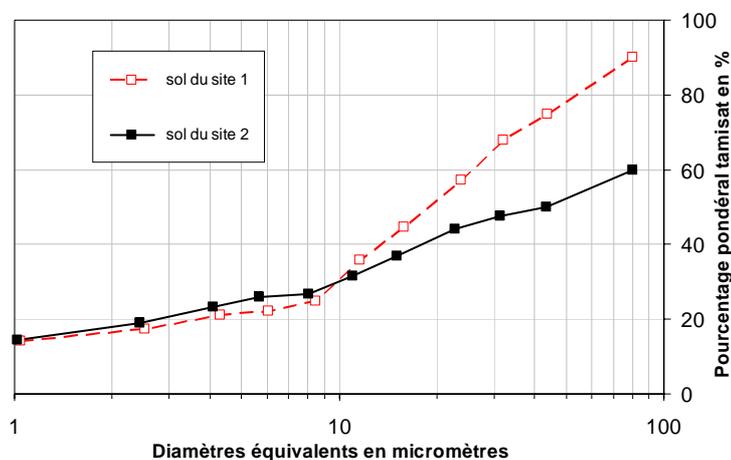


Figure 3.28 : Résultat des essais de sédimentométrie sur la masse passante à 80 micromètres

La société commercialisant les traitements nous a également indiqué que le sol du site 1 est de type limon argileux tandis que le sol du site 2 est de type limon sableux. La texture du sol du site 1 est donc plus fine que celle du sol du site 2. Les textures n'étant pas identiques, cela peut être une raison pour la différence de sensibilité aux traitements des deux sites.

L'explication de ce comportement ne peut cependant être pleinement justifiée par la présente étude essentiellement par manque des caractéristiques des produits de traitement qu'il serait

nécessaire d'avoir en même temps qu'une caractérisation complète des sols : CEC, nature minéralogique des argiles...

Si en première approche, la différence de comportement peut être reliée au type de sols testés, c'est-à-dire aux textures différentes (comme nous l'avons vu dans les parties précédentes), d'autres facteurs non évaluables peuvent également avoir une influence importante sur les résultats comme les conditions météorologiques expérimentées par les parcelles au cours du temps ou les processus mécaniques (herse...) subis par les sols...

3.3.2.4 Conclusion

Deux bilans peuvent être tirés de ces deux campagnes d'essais in situ : l'un relatif à l'objet de l'étude (les procédés de traitement), l'autre à la validation de notre nouvelle approche.

Concernant les procédés de traitement, l'étude a permis de conclure sur deux points :

- Le premier point est l'importance du site considéré. En effet, la présence ou l'absence de différence de comportement entre traitements, montre l'influence du site sur l'efficacité (ou non) des traitements considérés.
- Le second point est la différence observée et avérée de sensibilité à l'érosion selon le traitement utilisé (site 1). Une poursuite de l'étude serait cependant à envisager au niveau de la société qui nous a sollicité pour mieux comprendre ces deux aspects.

Concernant le nouveau protocole d'essai et son application in situ, ces campagnes d'essai ont permis de valider notre approche. L'essai a en effet donné des résultats tout à fait satisfaisants dans le sens où il a été permis d'une part de caractériser le phénomène d'érosion (moyenne et écart type des taux d'érosion) d'autre part de discerner des sols n'ayant vraisemblablement pas les mêmes sensibilités à l'érosion (comme cela est le cas sur le site noté 1).

3.4 CONCLUSIONS

Nous nous sommes intéressés, dans ce chapitre, à la caractérisation de la sensibilité à l'érosion des sols à l'aide de l'Erodimètre à Jets Mobiles, appareil fonctionnant à la fois en laboratoire et sur le terrain.

Partant de l'appareillage et du protocole existant développés par Hénensal et Duchatel (1990), nous avons proposé notre propre protocole d'essais dans le but de le rendre plus descriptif des phénomènes d'érosion.

Nous avons, ensuite, validé la nouvelle approche en laboratoire sur les textures de référence. En étudiant de manière affinée la dynamique d'évolution des rainures d'érosion, nous avons également proposé une rationalisation des résultats en vue d'une modélisation future de l'écoulement. Cela devrait permettre, à terme, d'extraire les paramètres classiques d'érosion (voir Chapitres 1 et 4)

Une première campagne d'essais a ensuite été menée in situ sur un remblai à Montoire-sur-le-Loir. Ces essais ont surtout permis de valider la faisabilité in situ du nouveau protocole. Quelques caractéristiques sur la sensibilité à l'érosion du remblai ont par ailleurs été tracées.

Deux autres campagnes d'essais ont ensuite eu lieu dans le cadre d'un contrat avec une entreprise de traitement de sols agricoles. Les essais menés ont permis de valider notre approche et les conclusions originales tirées de ce travail peuvent être considérées comme un succès de l'essai avec le nouveau protocole.

Pour aller plus loin dans l'utilisation de l'Erodimètre à Jets Mobiles et suite à ces campagnes d'essai, des améliorations du dispositif ont été décidées. Il s'agit notamment de piloter l'essai avec une pompe dans le but de mieux contrôler le débit au niveau des jets et de disposer d'un système automatique de mesure des profils par exemple par profil laser.

Enfin, la perspective, déjà soulignée, de pouvoir extraire des essais in situ des paramètres d'érosion plus généraux, comme la contrainte seuil ou le coefficient d'érosion, devrait faire de cet essai un outil complet et performant pour la mesure de la sensibilité à l'érosion in situ.

Chapitre 4 : Caractérisation de l'érosion par l'Essai d'Erosion de Trou

Nous nous intéressons, dans ce chapitre, à la caractérisation de la sensibilité à l'érosion par l'Essai d'Erosion de Trou.

Ce type d'essai modélise l'érosion interne par renard. Un trou initialement formé dans un échantillon de sol est ainsi mis en charge hydrauliquement et donc érodé. L'intérêt de ces essais, relativement simples, est de pouvoir trouver des grandeurs caractéristiques de l'érosion elles aussi simples et représentatives des phénomènes. C'est l'objectif du dispositif développé au LCPC et des méthodes d'interprétation qui y sont liées.

Nous verrons, dans une première partie, le dispositif et le protocole d'essai puis nous nous intéresserons au modèle d'interprétation. Nous verrons ensuite une étude typique avant de présenter une série d'essais systématiques visant à caractériser l'influence de la partie argileuse sur le processus d'érosion. Enfin une approche multi-échelle de la surface du trou sera proposée et liée aux résultats des essais.

4.1 APPAREILLAGE ET PRINCIPE DES ESSAIS

4.1.1 Généralité

Dans le but de caractériser l'érosion interne quantitativement, l'essai avec le « Hole Erosion Test » développé récemment par Wan et Fell (2002, 2004) est une avancée considérable.

Au LCPC, un dispositif d'essai de type « Hole Erosion Test » ou essai d'Erosion de Trou a été conçu et développé récemment (Vargas, 2005 ; Reiffsteck *et al.*, 2006 ; Gavasso, 2007). Il est similaire à celui développé par Wan et Fell mais présente un certain nombre de modifications destinées à le rendre plus facile d'usage et plus complet sur la mesure des paramètres d'érosion.

4.1.2 Appareillage

Le dispositif d'essai d'érosion de trou (« Hole Erosion Test », HET) du LCPC est représenté Figure 4-1. Le dispositif comporte quatre organes principaux : (1) le réservoir à l'amont, (2) la cellule d'essai, (3) la sortie d'eau à l'aval et (4) les dispositifs de mesure et le système d'enregistrement de données.

Réservoir d'eau à l'amont

Le réservoir à l'amont est un cylindre en PVC de 80 litres. Le réservoir possède deux entrées : air pour la mise sous pression et eau pour une réalimentation éventuelle du réservoir en cours

d'essai. L'unique sortie, d'eau, permet l'alimentation de la cellule d'essai. La pression d'air dans le réservoir est contrôlée à l'aide d'un manomètre.

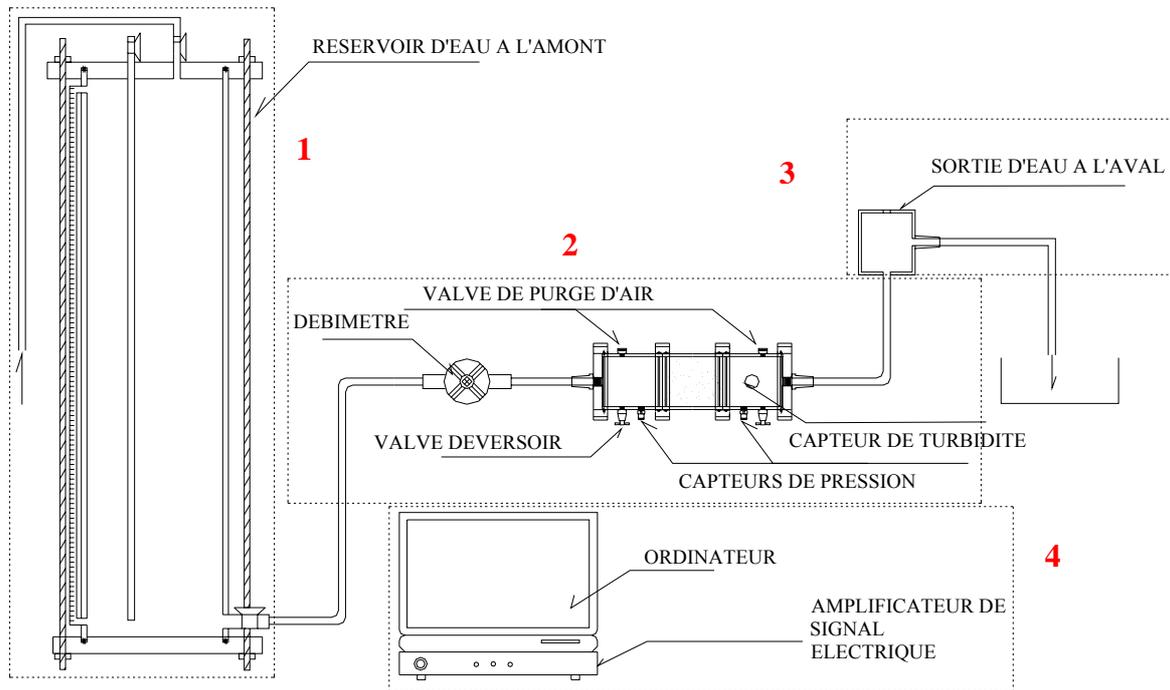


Figure 4-1 : Schéma du dispositif de « Hole Erosion Test » du LCPC

Cellule d'essai

La cellule d'essai comprend trois parties (Figure 4-2).

La première partie est la chambre d'entrée d'eau. Outre une valve de purge d'air, un capteur de pression (amont), une valve d'évacuation d'eau, cette partie comprend un nid d'abeille côté échantillon dans le but de diminuer les remous en entrée de trou.

La deuxième partie consiste en l'échantillon de sol. C'est une éprouvette de sol de 7 cm de diamètre et de 13 cm de longueur avec un trou préformé. L'éprouvette est compactée directement dans le moule d'essai en plexiglas. Ce moule transparent permet de vérifier qu'il n'y a pas d'érosion parasite entre le sol et le moule.

La troisième partie est la chambre de sortie d'eau. Cette partie, de 4cm de diamètre intérieur, comprend une valve de purge d'air et un capteur de pression (aval). Un turbidimètre est placé juste après cette partie dans le but de mesurer la turbidité du fluide en sortie de l'éprouvette.

Sortie d'eau à l'aval

La colonne d'eau à l'aval, constante, est de 20 cm.

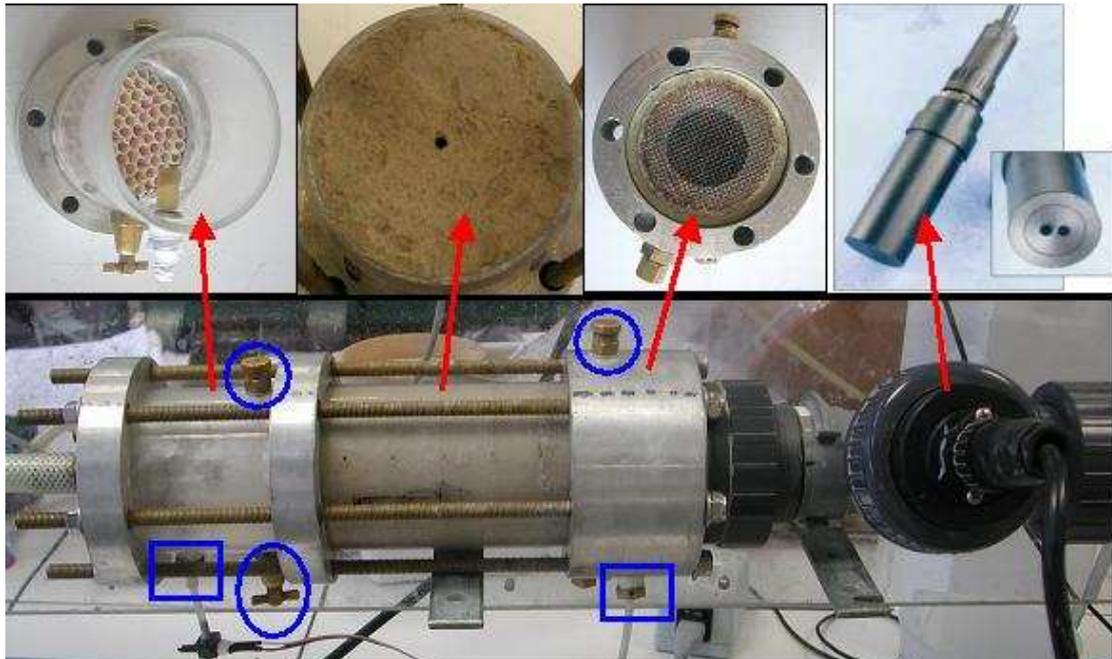


Figure 4-2 : Cellule d'essai avec le turbidimètre
Symboles rectangulaires : capteurs de pression, symboles ronds : valves de purge d'air, symbole elliptique : valve d'évacuation d'eau

Dispositifs de mesure et système d'enregistrement de données

Le dispositif d'Erosion de Trou LCPC comprend les dispositifs de mesure suivants :

- un débitmètre (2 - 30 litres/minute de précision) Tico 0735P5 Hengstler placé à l'amont de la cellule,
- deux capteurs de pression de type 40 PC Series Miniature Signal Conditioned Pressure Sensors (PK 88820) du fabricant Honeywell de plage de mesure 103,4 kPa (15 Psi) placés à l'amont et à l'aval de l'éprouvette,
- un turbidimètre modèle A15/76 ATI placé à l'aval de l'éprouvette,
- un dispositif électronique de mesures multi-voies « spider 8 » de HBM, pour le traitement des signaux des capteurs et leur renvoi vers l'ordinateur,
- un ordinateur pour enregistrer les données au cours de l'essai.

Une description détaillée du dispositif d'essai est donnée en Annexe C.

4.1.3 Echantillon d'essai

L'échantillon d'essai ou éprouvette a une forme cylindrique de 7 cm de diamètre et de 13 cm de longueur (volume : 500 cm³). Les échantillons considérés sont pour le moment des sols remaniés, bien qu'il soit envisageable de tester des sols non remaniés. Pour avoir une compacité suffisamment uniforme, l'échantillon est compacté dynamiquement en 6 couches d'égale épaisseur. Le sol est préparé à l'avance à une teneur en eau donnée et la quantité de matériau hydraté nécessaire à chaque couche est déterminée pour obtenir la densité finale désirée (généralement 95% de l'OPN). Le trou, au milieu de l'échantillon, est finalement réalisé à l'aide d'une perceuse verticale avec un foret de 3 mm de diamètre. Les détails de la préparation de l'échantillon sont présentés dans l'annexe C.

4.1.4 Protocole d'essai

Montage de la cellule dans l'appareil

L'éprouvette de sol est fixée avec les deux autres parties de la cellule d'essai grâce à 6 tiges filetées. Le réservoir est rempli d'eau du robinet. Après avoir raccordé le débitmètre et le turbidimètre avec la cellule d'essai, l'échantillon est doucement chargé en eau en même temps à l'amont et à l'aval afin de ne pas perturber le sol dans l'éprouvette. Les valves de purge d'air sont alors ouvertes. Lorsque l'eau est sortie par les valves de purge d'air, les valves sont fermées après avoir vérifié qu'il ne reste plus d'air. Le robinet du réservoir à l'amont est fermé pour avoir un état statique d'équilibre hydraulique. Enfin, le programme d'enregistrement développé sous l'environnement Labview de National Instruments est mis en marche et les capteurs de pression sont initialisés.

Déclenchement et suivi de l'essai

Un fichier pour enregistrer les données est ouvert. Les pressions hydrauliques initiales à l'amont et à l'aval sont initialisées. Le robinet du réservoir est ouvert, le manomètre est réglé pour monter progressivement la pression hydraulique à l'amont jusqu'à la valeur désirée. Le saut hydraulique (la différence entre la pression hydraulique à l'amont et celle à l'aval) est maintenu à la valeur constante de l'essai. Le trou s'agrandissant pendant l'essai, les pertes de charge relatives dans le circuit hydraulique varient. La perte de charge relative dans l'éprouvette (par rapport au reste du circuit) diminue et il faut donc augmenter la pression dans le réservoir de sorte à maintenir une perte de charge absolue constante dans l'éprouvette. Les différents paramètres sont enregistrés au cours d'essai à une fréquence de 1Hz : pression amont et aval, débit, turbidité.



Figure 4-3 : Un essai d'érosion de trou en cours

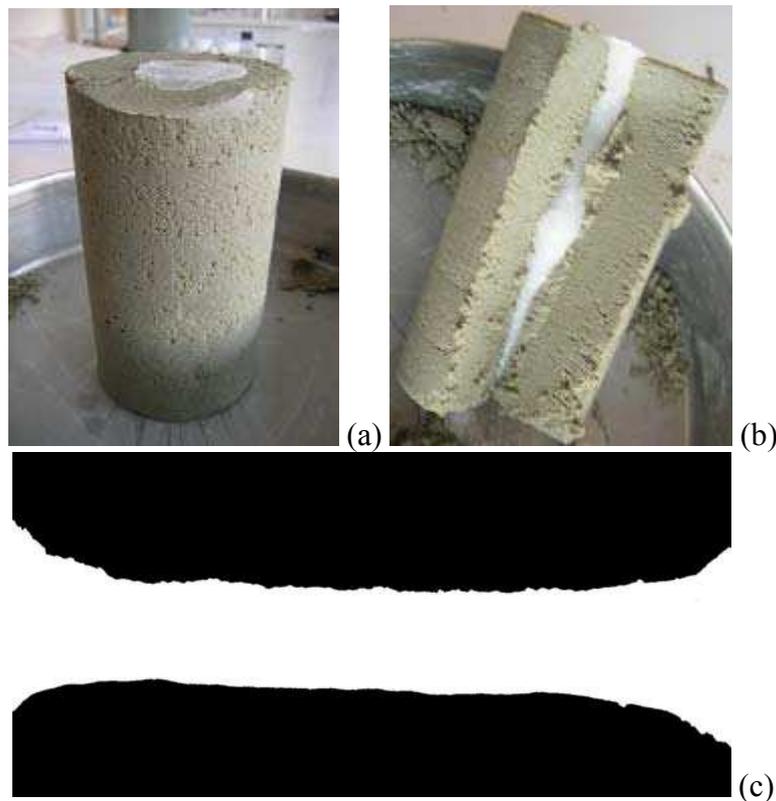
Arrêt de l'essai

Lorsque la perte de charge totale chute de manière trop importante, l'augmentation de pression dans le réservoir n'est plus suffisante pour maintenir une différence de pression constante au niveau de l'échantillon. C'est typiquement le cas lorsque le diamètre du trou devient de l'ordre de grandeur du diamètre des tuyaux alimentant le circuit. La pression dans le réservoir est alors doucement diminuée et ramenée à zéro, dans le but de ne pas trop

perturber l'échantillon. L'essai est alors terminé : le robinet du réservoir est fermé et l'enregistrement des données est arrêté. L'eau restante est enfin évacuée.

Mesure du volume final du trou

L'échantillon de sol érodé est sorti du dispositif et de la paraffine liquide est versée dans le trou élargi (Figure 4-4a). L'échantillon est découpé pour sortir la « bougie » intacte (Figure 4-4 b). Cette dernière représente la forme du trou de l'éprouvette après l'érosion (Figure 4-4 c). La mesure du volume ou de la masse de la « bougie » permet de calculer le diamètre moyen final du trou érodé et la masse totale du sol érodé pendant l'essai.



*Figure 4-4 : Mesure du volume final du sol érodé
(a : Création de la bougie ; b : sortie de la bougie ; c : forme finale du trou)*

Les détails du protocole d'essai sont présentés dans l'annexe C.

4.2 MODELE D'INTERPRETATION DES ESSAIS

On désigne comme loi d'érosion la relation qui lie les deux quantités physiques suivantes :

- La contrainte tangentielle τ :

Elle représente la contrainte de cisaillement appliquée sur la surface du trou par le fluide en écoulement.

- Le taux d'érosion par unité de surface et de temps ($\dot{\epsilon}$) :

Il représente la masse de sol érodé par unité de surface et de temps.

Il est généralement constaté une loi d'érosion empirique de la forme :

$$\dot{\epsilon} = k_{er} \times (\tau - \tau_c), \quad (4.1)$$

où k_{er} (unité SI : $s.m^{-1}$) est le coefficient d'érosion du sol et τ_c (unité SI : Pa) est la contrainte de cisaillement critique. Notons cependant qu'aucun autre fondement que l'expérience ne justifie une telle loi. Il faut donc envisager, sans a priori, toute relation entre τ et $\dot{\epsilon}$. C'est précisément l'objet de ce travail. Pour cela, après avoir posé les équations physiques reliant ces deux quantités aux paramètres caractérisant l'essai, nous présenterons comment il est possible d'exploiter ces équations dans nos essais afin de trouver une relation entre τ et $\dot{\epsilon}$.

4.2.1 Détermination de la contrainte de cisaillement et du taux d'érosion

Considérons le trou percé dans l'échantillon de la cellule d'essai. Il peut être modélisé par un cylindre creux de rayon R et de longueur L , soumis à une différence de pression ΔP dans lequel l'eau s'écoule en exerçant une contrainte tangentielle sur les bords.

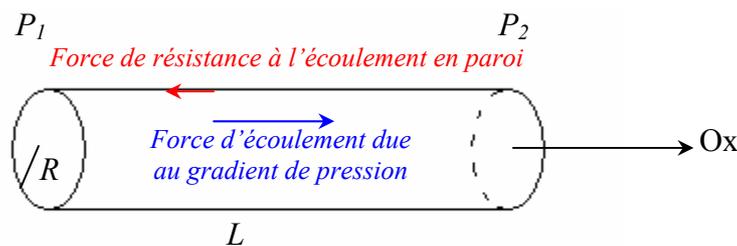


Figure 4-5 : Schéma de l'écoulement dans le trou

L'écoulement dans le trou est supposé quasi stationnaire et l'écoulement à un instant t peut être supposé comme celui établi dans une conduite de rayon $R(t)$. Considérons alors la Figure 4-5, un simple bilan des forces effectué sur un volume du fluide dans la direction Ox nous permet d'exprimer la contrainte de cisaillement τ :

$$\tau \times P_t \times L = \Delta P \times S \quad (4.2)$$

où L est la longueur de l'échantillon, $\Delta P = P_1 - P_2$ le saut de pression aux bords de l'échantillon, P_t le périmètre mouillé (en fait la circonférence du trou dans nos essais) et S la section du trou.

À partir de l'équation précédente, nous en déduisons :

$$\tau = \frac{R}{2} \times \frac{\Delta P}{L} \quad (4.3)$$

où R est le rayon du trou équation similaire à l'équation (2.1).

Par définition, le taux d'érosion $\dot{\epsilon}$ est égal à la masse de sol érodée par unité de surface et de temps. Nous pouvons donc exprimer le taux d'érosion :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\text{variation de masse solide}}{\text{unité de surface} \times \text{unité de temps}} = \frac{dM}{dS \times dt}$$

$$\text{Soit } \dot{\varepsilon} = \rho_s \times \frac{dR}{dt} \quad (4.4)$$

où ρ_s est la masse volumique sèche du sol (équation similaire à l'équation 2.2).

Les paramètres tels que ΔP , L ou ρ_s sont soit enregistrés au cours de l'essai soit connus préalablement. Le paramètre restant, le plus difficile à déterminer pour calculer la contrainte de cisaillement τ et le taux d'érosion $\dot{\varepsilon}$ est donc le rayon du trou $R(t)$ au cours de l'essai.

Différentes méthodes ont été employées pour pallier la possibilité de mesurer ce rayon au cours du temps.

Wan et Fell (2002, 2004) ont évalué le coefficient de friction (liant vitesse moyenne de l'écoulement, contrainte de cisaillement et rayon) en début et en fin d'essai et supposé que ce dernier variait linéairement. Cette approche pose deux difficultés. La première est que le coefficient de frottement initial n'est pas forcément représentatif de celui en cours d'essai. En effet, la surface du trou en début d'essai est particulièrement remaniée du fait du perçage du trou et n'est pas nécessairement représentative de cette même surface une fois l'érosion établie. La seconde difficulté tient au fait qu'aucune raison physique ou mécanique ne permet d'établir que le coefficient d'érosion varie linéairement en fonction du temps dans les essais d'érosion de trou.

Bonelli *et al.* (Bonelli *et al.* 2004, 2006 ; Benhamed et Bonelli 2007) partent de lois d'écoulement reliant débit (ou vitesse moyenne), différence de pression et rayon. Or ces lois soulèvent certains problèmes. En effet, elles sont certes bien établies d'un point de vue empirique mais seulement lorsque le régime d'écoulement turbulent est pleinement avéré. Cela pose donc des difficultés lorsque les écoulements sont transitoires entre régime laminaire et turbulent ce qui est le cas en pratique dans un certain nombre d'essais HET. Par ailleurs, ces lois font également intervenir un terme de rugosité relative pas nécessairement constant au cours des essais.

Pour s'affranchir de ces limites et dans le but de ne pas avoir recours à des lois d'écoulement non-établies de manière univoque, nous avons donc cherché à rationaliser l'utilisation du signal de turbidité pour calculer le rayon du trou au cours du temps.

4.2.2 Détermination du rayon instantané du trou et validation de notre approche de calcul

Exploitation du signal de turbidité pour exprimer la masse finale érodée

La nouvelle version du Hole Erosion Test développée par le LCPC consiste à utiliser la turbidité pour caractériser l'évolution du trou à l'intérieur de l'éprouvette. La grande différence par rapport aux modèles précédemment développés sur le Hole Erosion Test est que cette mesure nous permet de mieux quantifier l'évolution du rayon.

En effet, le signal de turbidité (généralement en ppm) est lié à la charge en particules de sol du fluide érodant à sa sortie de l'échantillon (Bendahmane, 2005). Elle rend ainsi compte de la transparence de l'eau qui s'écoule à l'aval de l'éprouvette au cours du temps. Intuitivement, on comprend que la turbidité va dépendre de la concentration en particules de sol dans le fluide, c'est à dire à la quantité de sol érodé. Cependant le signal de turbidité n'est pas simplement une fonction linéaire de la concentration solide mesurée de n'importe quel effluent.

La turbidité T sera entre autres une fonction croissante du nombre de particules à l'aval de l'éprouvette et une fonction croissante de la concentration massique de sol dans les effluents, pour un type de particule donné. On fait ainsi alors l'hypothèse que pour une texture donnée la turbidité est proportionnelle à la concentration de sol C_{sol} (unité SI : kg/m^3) dans le fluide, soit :

$$T = \alpha \times C_{sol}$$

avec α , un facteur de proportionnalité à déterminer pour chaque texture. Notons que cette hypothèse suppose, entre autres, que le sol soit dispersé de la même manière dans le fluide indépendamment de la pression appliquée. Cela implique que nous supposons dans ce cadre que la contrainte fait varier le taux d'érosion mais pas les caractéristiques du matériau érodé (typiquement la taille des floes).

On peut alors relier directement la turbidité à l'aval de l'éprouvette à la masse de sol érodée. En effet, pendant un temps dt , la quantité de sol érodé dm est définie par :

$$dm = Q \times C_{sol} \times dt$$

où Q est le débit de l'écoulement, C_{sol} la concentration du sol érodé dans l'eau et dt l'intervalle de temps. ce qui donne :

$$dm = \frac{1}{\alpha} Q T dt$$

En intégrant cette expression nous obtenons M_f la masse finale érodée en fin d'essai :

$$M_f = \int_0^{t_f} \frac{1}{\alpha} Q T dt$$

où t_f est le temps correspondant à l'arrêt de l'essai.

Or, l'enregistrement des paramètres temps, débit et turbidité est effectué chaque seconde par le logiciel LabView pendant l'essai. La masse finale érodée M_f devient donc l'expression discrétisée de l'intégrale précédente :

$$M_f = \sum_{i=1}^f \frac{1}{\alpha} Q(t_i) T(t_i) (t_i - t_{i-1}) = \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^f Q(t_i) T(t_i) (t_i - t_{i-1})$$

Détermination expérimentale de la masse finale érodée M_f

La masse finale érodée peut également être déterminée à partir d'une mesure du volume du trou final moulé à la paraffine. La masse volumique de la paraffine ρ_{para} étant connue, on peut aisément connaître le volume du trou final et en déduire la masse de sol érodée M_f ainsi que le rayon moyen final du trou R_f :

$$V_{trou\ final} = V_{paraffine} = \frac{M_{para}}{\rho_{para}} = \pi R_f^2 L$$

$$M_f = \rho_s V_{\text{trou final}} - \rho_s V_{\text{trou initial}}$$

soit $M_f = \left(\frac{\rho_s \times M_{\text{para}}}{\rho_{\text{para}}} \right) - \pi \rho_s R_0^2 L$ et $R_f^2 = \frac{1}{\pi L} \times \frac{M_{\text{para}}}{\rho_{\text{para}}}$

où R_0 est le rayon initial du trou.

Détermination de α et validation de notre approche

Pour déterminer le coefficient de proportionnalité α entre la turbidité et la concentration de particules de sol dans les effluents, il suffit de tracer la masse érodée cumulée $S(QT\delta t) = \sum_{i=1}^f Q(t_i)T(t_i)(t_i - t_{i-1})$ en fonction de la masse M_f déterminée à partir du volume de paraffine.

La Figure 4-6 représente ces données pour des mélanges sable-argile kaolinite en différentes proportions. Elles ont été obtenues pour différents essais en faisant varier gradient hydraulique, moment final de l'essai (t_f) et texture de sol.

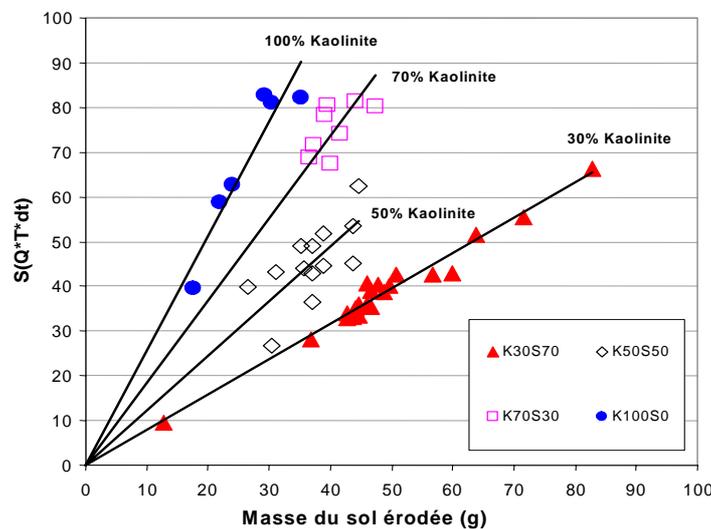


Figure 4-6 : Relation entre la masse du sol érodée et la somme $S = \Sigma(QT\delta t)$

La Figure 4-6 nous montre une relation linéaire entre la masse du sol érodée et la somme S . La pente de la droite augmente lorsque la fraction fine du sol est plus élevée : pour une même masse érodée, le signal de turbidité sera plus élevé pour les textures les plus fines. Cela est tout à fait logique puisque les textures dispersées les plus fines sont celles qui ont (de loin) le plus grand nombre de particules par unité de volume de suspension et sont donc les plus opaques.

Les coefficients de détermination des droites des textures K30S70 et K100S0 sont élevés ($\approx 0,9$), cela signifie que la corrélation entre la masse érodée et la turbidité est bonne. Les coefficients des textures K50S50 et K70S30 sont faibles faute des points intermédiaires. Cependant, dans un mélange d'argile et de sable, les grains argileux sont à la fois beaucoup plus fins et en nombre beaucoup plus important. En conséquence, nous pouvons avoir l'intuition que le signal de turbidité est principalement dû à la fraction argileuse. C'est bien ce qui est observé Figure 4-7 où la somme $S(QT\delta t)$ a cette fois ci été représentée en fonction de

la masse d'argile érodée m_{arg_f} ($m_{arg_f} = f_{arg} M_f$, où f_{arg} est la fraction massique d'argile contenu dans la texture initiale).

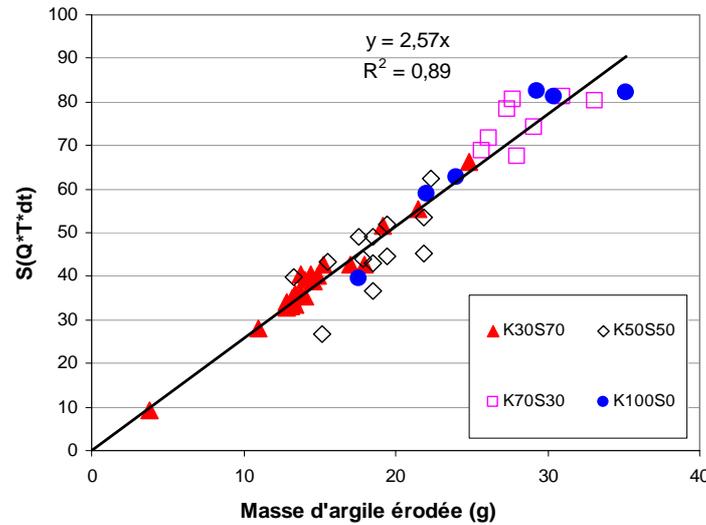


Figure 4-7 : Relation entre la masse d'argile érodée et la somme S

La loi linéaire trouvée entre la somme $S(QT\delta t)$ et la masse d'argile érodée montre que c'est bien les particules fines qui sont responsables du signal de turbidité. Elle permet de justifier l'hypothèse de proportionnalité entre concentration (en particules fines) de l'effluent et signal de turbidité. En effet, rappelons que les données de la Figure 4-7 ont été obtenues, pour des essais différents, avec des différences de pression appliquées différentes, des temps finaux (et donc des diamètres finaux) différents et des textures différentes.

Notre approche est donc bien vérifiée par une loi linéaire. Nous avons également pu déterminer le coefficient $\alpha_{arg} = 2,57 \text{ m}^3/\text{kg}$ de proportionnalité entre signal de turbidité et concentration massique en argile de l'effluent pour des textures sable-argile kaolinite. Notons que le coefficient α , qui est différent pour chaque texture s'exprime alors simplement par : $\alpha = \alpha_{arg} / f_{arg}$.

Calcul du rayon $R(t)$

Maintenant que nous avons montré la proportionnalité entre signal de turbidité et concentration en sol de l'effluent, la détermination de la valeur du diamètre du trou au cours du temps peut se faire de deux manières que nous explicitons ci dessous.

Méthode individuelle

Cette méthode consiste à calculer le diamètre du trou instantané à partir de ses valeurs initiale et finale, ainsi que du produit $Q*T$ cumulé.

En effet, d'après ce qui précède, on peut écrire :

$$\forall i \in \{1; \dots; f\} \quad \Delta V_i = \frac{\pi L}{4} (D_i^2 - D_0^2) = \frac{M_i}{\rho_s}$$

$$\Delta V_f = \frac{\pi L}{4} (D_f^2 - D_0^2) = \frac{M_f}{\rho_s}$$

d'où

$$\frac{M_i}{M_f} = \frac{\frac{1}{\alpha} \sum_{j=1}^i Q(t_j)T(t_j)\delta t}{\frac{1}{\alpha} \sum_{j=1}^f Q(t_j)T(t_j)\delta t} = \frac{D_i^2 - D_0^2}{D_f^2 - D_0^2} \quad \text{soit } D_i = \sqrt{D_0^2 + (D_f^2 - D_0^2) \frac{\sum_{j=1}^i Q(t_j)T(t_j)dt}{\sum_{j=1}^f Q(t_j)T(t_j)dt}}$$

où ΔV_i est la variation de volume du trou érodé entre le début de l'essai et l'instant i , et M_i la masse de sol érodé à l'instant i , D_i le diamètre du trou à l'instant i , $Q(t_i)$ et $T(t_i)$ le débit et la turbidité à l'instant i . Cette méthode peut être qualifiée d'intra-essai puisqu'elle revient à calculer le coefficient α uniquement en considérant l'essai courant.

Méthode généralisée

Une seconde manière d'obtenir la loi d'érosion est d'utiliser la valeur de α déterminée précédemment.

On a alors, par définition de α :

$$M_t = \sum_{i=1}^t \frac{1}{\alpha} Q(t_i)T(t_i)\delta t = \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^t Q(t_i)T(t_i)\delta t$$

où M_t est la masse érodée à l'instant t .

Cette masse correspond à un diamètre de trou D_t supérieur à la valeur initiale du diamètre D_0 .

On a ainsi la relation suivante : $\frac{M_t}{\rho_s} = \pi L \frac{(D_t^2 - D_0^2)}{4}$

$$\text{Soit } D_t = \sqrt{D_0^2 + \frac{4}{\pi L \rho_s} \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^t Q(t_i)T(t_i)\delta t}$$

Cette méthode peut être qualifiée d'inter-essai puisqu'elle revient à estimer le coefficient α en considérant l'ensemble des essais.

L'intérêt d'analyser les essais sous l'angle de la méthode généralisée permet de dégager un degré de précision du coefficient α . En effet, celui-ci peut être déterminé pour un essai donné (c'est-à-dire pour une texture donnée et à ΔP donné, i.e. cela revient à la méthode individuelle). On peut ensuite le généraliser à une texture donnée, quelle que soit la pression ; puis à n'importe quelle texture, quelle que soit la pression. Ainsi, plus α peut être généralisé, plus son degré de précision augmente, parce qu'il correspond alors à un plus grand nombre d'essais. Le fait de savoir le diamètre final n'est alors plus nécessaire pour établir la loi d'érosion.

La comparaison entre les résultats des deux méthodes de calcul permet de s'assurer de la cohérence des résultats et de la robustesse de l'approche.

Tracé de la loi d'érosion

Nous rappelons que le but de la loi d'érosion est d'obtenir $\dot{\varepsilon}$ en fonction de τ , et de chercher une loi simple liant ces deux paramètres à partir du graphique obtenu.

D'après les définitions précédentes de $\dot{\varepsilon}$ et τ , nous pouvons écrire les deux paramètres en fonction du diamètre du trou pour chaque instant i :

$$\forall i \in \{1; \dots; f-1\}$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \rho_s \left(\frac{dR}{dt} \right)_i = \frac{\rho_s}{2} \frac{D_{i+1} - D_{i-1}}{(t_{i+1} - t_{i-1})} = \frac{\rho_s (D_{i+1} - D_{i-1})}{4\delta t}$$

$$\tau_i = \frac{\Delta P}{2L} R_i = \frac{\Delta P}{4L} D_i$$

Ces expressions nous permettent ainsi de tracer $\dot{\varepsilon}$ en fonction de τ à chaque instant i .

4.3 RESULTATS TYPIQUES ET OBTENTION DE LA LOI D'EROSION

4.3.1 Paramètres mesurés

Les paramètres mesurés au cours de l'essai comprennent la pression hydraulique appliquée entre l'amont et l'aval (il est rappelé que cette pression est maintenue constante manuellement), le débit de l'écoulement à l'amont et la turbidité de l'eau à l'aval de l'échantillon.

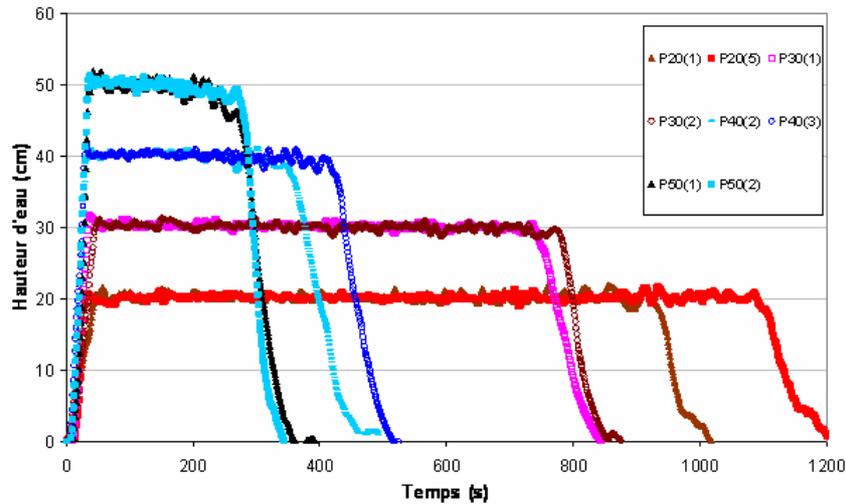


Figure 4-8 : Evolution de la pression au cours du temps de la texture K50S50

La Figure 4-8 montre la différence de pression appliquée pour une texture du sol. La pression est montée progressivement jusqu'à la valeur désirée, elle est maintenue à cette valeur jusqu'au moment tant que la perte de charge dans le reste du circuit hydraulique peut être compensée puis elle est descendue à zéro vers la fin d'essai.

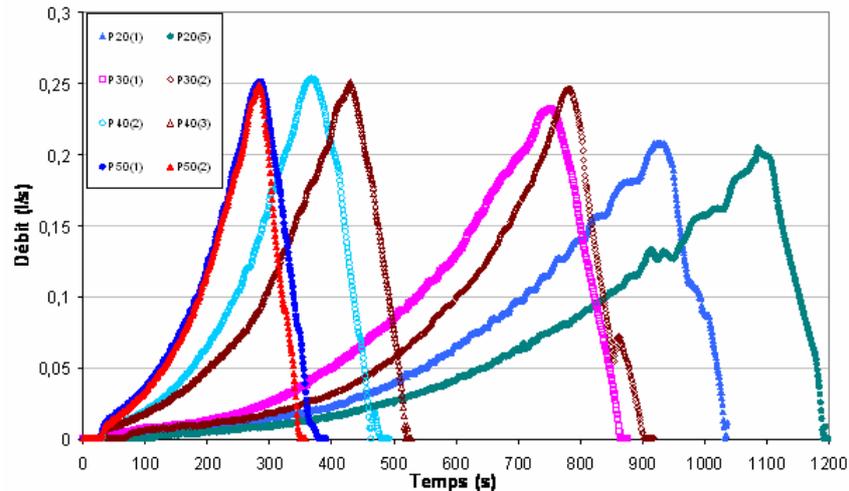


Figure 4-9 : Evolution du débit de l'écoulement au cours du temps de la texture K50S50

La Figure 4-9 montre la progression du débit de l'écoulement dans le trou préformé de l'échantillon d'une texture du sol. Au cours du temps, le phénomène d'érosion se développe, le trou s'élargit ce qui provoque l'augmentation du débit. La phase de diminution du débit correspond à la descente de la pression appliquée. On constate que plus la pression appliquée est élevée, plus le débit atteint la valeur maximale rapidement, cela signifie naturellement que le sol s'érode plus vite.

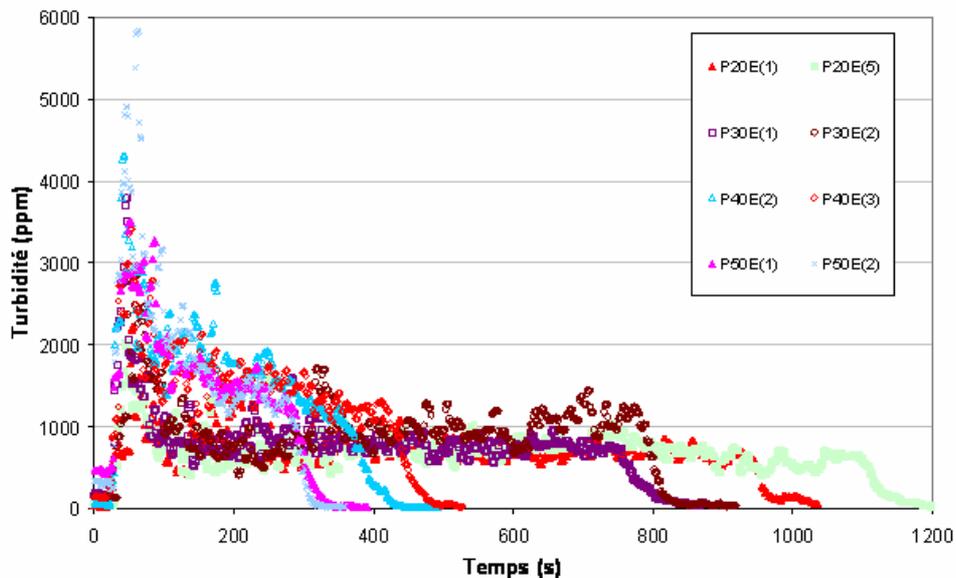


Figure 4-10 : Evolution de la turbidité de l'écoulement au cours du temps de la texture K50S50

La Figure 4-10 montre l'évolution de la turbidité de l'écoulement d'une texture du sol. La turbidité augmente lorsque la pression appliquée augmente, elle décroît ensuite plus ou moins fortement dans la phase constante de pression et elle diminue lorsque la pression diminue à la fin d'essai.

4.3.2 Courbe typique de la loi d'érosion interne

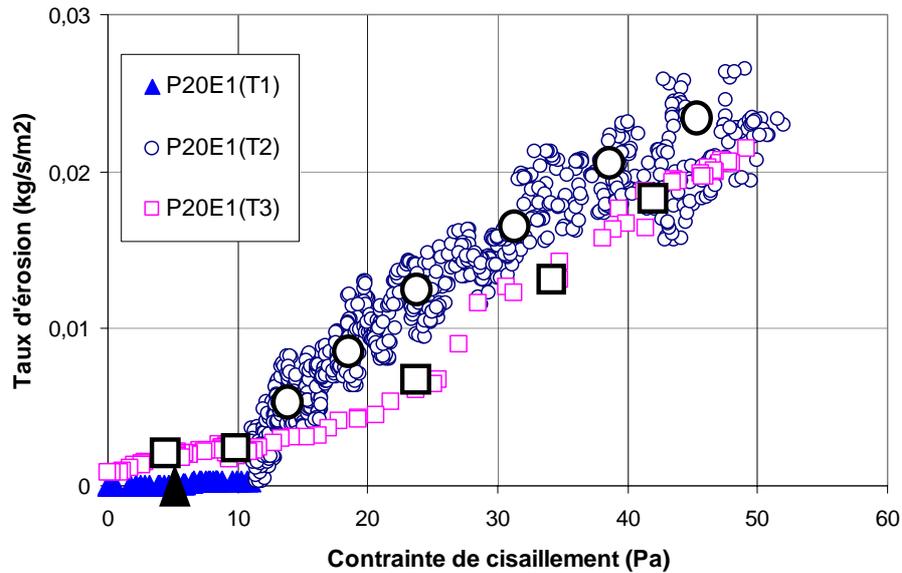


Figure 4-11 : Courbe typique de la loi d'érosion interne et moyennes obtenues (gros symboles) : texture K50S50, $\Delta P=20\text{mbar}$

La Figure 4-11 présente une courbe typique de la relation entre la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion. Nous constatons que l'essai se déroule en trois temps :

- ◆ Le premier temps (T1), représenté par des triangles pleins ($\blacktriangle \blacktriangle \blacktriangle$), correspond à la montée en pression et au tout début de l'essai. Dans cette période, l'érosion tarde à se produire car la contrainte de cisaillement n'est pas encore suffisamment élevée pour déclencher l'érosion. De plus, comme la surface du trou est façonnée par le perçage, ces points ne peuvent pas être considérés comme significatifs.
- ◆ Le deuxième temps (T2), représenté par des cercles creux ($\circ \circ \circ$), correspond à l'essai proprement dit. Contrainte de cisaillement et taux d'érosion augmentent significativement. C'est la loi d'érosion que nous cherchons à caractériser.
- ◆ Le troisième temps (T3), représenté par des carrés creux ($\square \square \square$), correspond à la fin rapide d'essai. L'hypothèse de la quasi-stationnarité du phénomène n'est certainement plus respectée. De plus le signal de turbidité met un certain temps à relaxer. Ces valeurs là non plus ne sont pas significatives.

Lors de l'exploitation des résultats pour la recherche d'une loi d'érosion seul le deuxième temps sera par conséquent considéré.

4.3.3 Automatisation de l'exploitation des résultats

Afin de rendre plus lisible les graphiques de la loi d'érosion, il a été décidé de traiter les données brutes en les moyennant et en les lissant (Pitre, 2008).

L'ensemble des mesures effectuées pendant un essai HET est enregistré dans un fichier texte à l'aide du logiciel « LabView ». Le traitement des données sur Excel a alors été mis au point à l'aide de deux macros.

Ces deux macros ont pour but de tracer la loi d'érosion à partir des deux méthodes de calcul du diamètre du trou présentées précédemment.

De manière succincte, la première macro commence par lisser les données brutes données par « LabView ». Sont ainsi lissés le débit, la pression à l'amont et à l'aval de la cellule, ainsi que la turbidité. Elle calcule ensuite le diamètre du trou à chaque instant t à partir de deux valeurs qu'elle requiert au préalable : le diamètre du trou initial et le diamètre final déterminé par la masse de paraffine. Sont ensuite calculées les valeurs de la contrainte de cisaillement et du taux d'érosion, pour ensuite pouvoir tracer la loi recherchée selon la « méthode individuelle ».

La seconde macro s'occupe de calculer le diamètre du trou à partir de la « méthode généralisée ». Elle requiert pour cela deux valeurs au préalable : la valeur du diamètre initial ainsi que la valeur du coefficient α que l'on aura déterminé pour chaque texture de sol. Sont alors recalculées les valeurs de la contrainte de cisaillement et du taux d'érosion.

Enfin, chacune des deux macros permet de tracer une loi d'érosion moyennée à partir des calculs antérieurs. En effet, la trop grande quantité de points permettant de tracer la loi d'érosion rendait les graphes illisibles. L'exploitation des résultats a alors consisté à moyennner sur des intervalles de temps T les valeurs de $\dot{\varepsilon}$ et de τ , chaque intervalle recoupant le précédent à mi-valeur, comme expliqué sur la Figure 4-12.

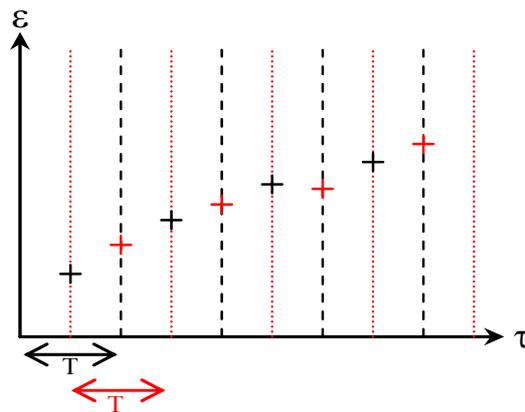


Figure 4-12 : Méthode de calcul des moyennes

Les valeurs des différents intervalles utilisés pour l'exploitation des résultats sont les suivantes :

- lissage du débit : 7s,
- lissage des pressions amont et aval : 5s,
- lissage de la turbidité : 59s,
- intervalle T : 40s.

Un exemple représentatif de courbe d'érosion est représenté Figure 4-13. Les données traitées sont celles de la Figure 4-11 sur laquelle apparaît également sur la forme de gros symboles un échantillon des données traitées.

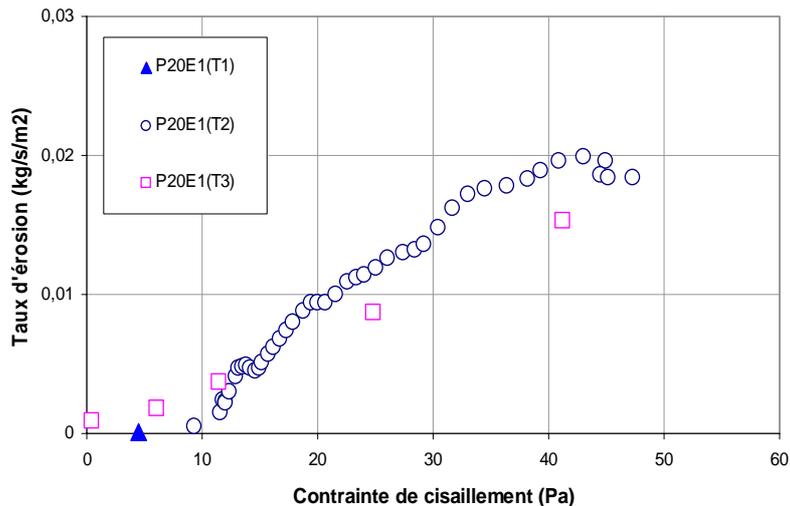


Figure 4-13 : Courbe typique de la loi d'érosion interne après lissage et calcul de moyennes : texture K50S50, $\Delta P=20\text{mbar}$

4.3.4 Loi d'érosion

Après avoir traité les données pour un essai donné, nous nous intéressons maintenant à caractériser plus en avant la loi d'érosion pour un sol donné en considérant un ensemble d'essais à des différences de pression variées.

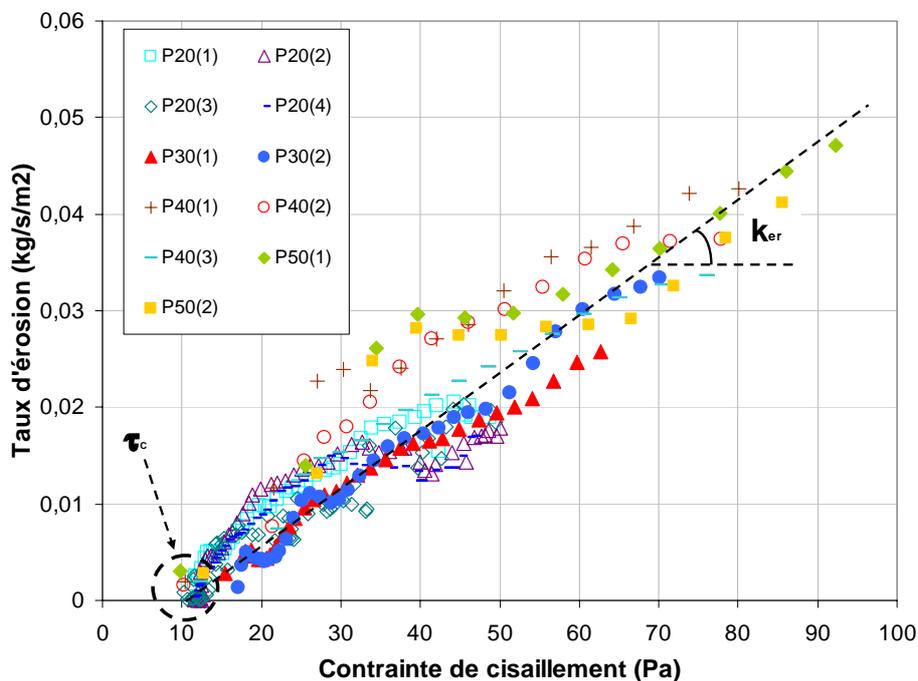


Figure 4-14 : Lois d'érosion de la texture K50S50 trouvée par la méthode individuelle pour différents essais à plusieurs différences de pression (de 20 à 50mbar)

La Figure 4-14 montre les données d'érosion $\dot{\epsilon}$ et τ calculés pour une texture de sol donnée (50% Argile Kaolinite et 50% Sable) et pour cinq différences de pressions.

Nous constatons successivement que :

- l'essai est bien répétable, puisque les essais réalisés aux mêmes pressions donnent des résultats comparables,
- l'essai est indépendant de la différence de pression appliquée ΔP puisque les données se placent sur la même courbe quel que soit ΔP ,
- il y a bien une loi d'érosion caractéristique de l'érosion du matériau testé qui peut de plus être mise sous la forme $\dot{\epsilon} = k_{er}(\tau - \tau_c)$.

Les résultats de la Figure 4-14 sont obtenus par l'utilisation de la « méthode individuelle » d'évaluation du rayon tandis que ceux de la Figure 4-15 sont obtenus par la « méthode généralisée ».

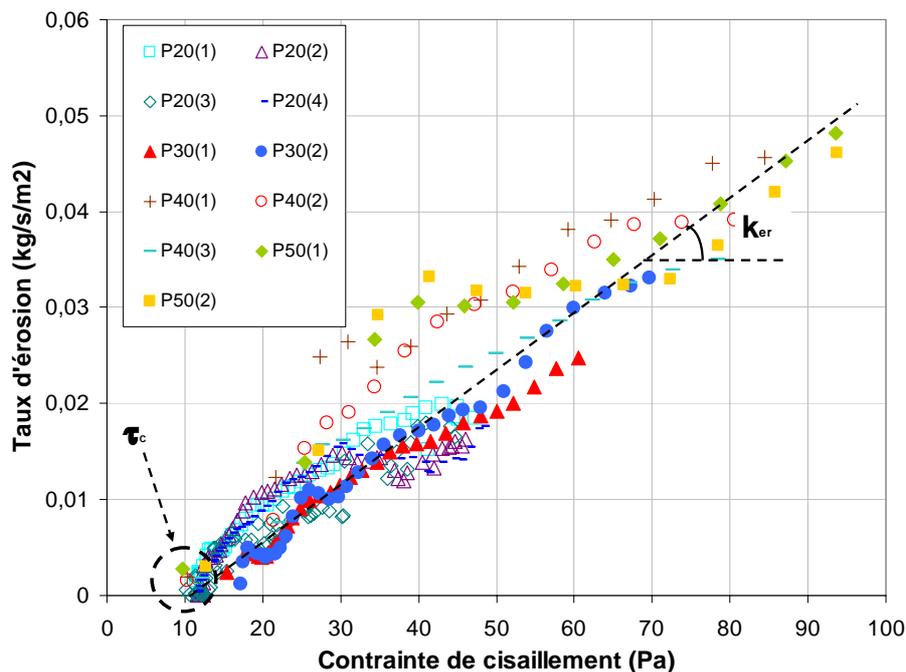


Figure 4-15 : Lois d'érosion d'une texture de sol trouvée par la méthode généralisée

On constate que les résultats dans les deux méthodes sont parfaitement similaires. Cela confirme la cohérence des résultats et la robustesse de notre approche pour une évaluation précise (c'est-à-dire juste et fidèle) du coefficient de proportionnalité turbidité-concentration en sol de l'effluent.

L'ensemble de ces observations permet de valider notre nouvelle méthode de calcul des paramètres d'érosion par l'utilisation du signal de turbidité.

4.3.5 Comparaison des résultats calculés selon la méthode de Wan et Fell

La Figure 4-16 présente les résultats d'une texture du sol obtenus selon la méthode de calcul de Wan et Fell (2002, 2004). Par rapport à notre approche (Figure 4-15), les résultats ci-dessus sont moins cohérents et plus dispersés. Bien que la pente soit similaire pour les différentes pressions appliquées, les valeurs de contrainte de cisaillement critique ne sont pas exploitables et il n'y a pas de courbe unique.

Dans le cadre de nos essais, nous retiendrons que la méthode de traitement utilisée par Wan et Fell n'est ni répétitive, ni exploitable. Ceci peut avoir pour origine les limites que nous avons citées dans la partie 4.2.1 traitant de la méthode d'exploitation des données mesurées.

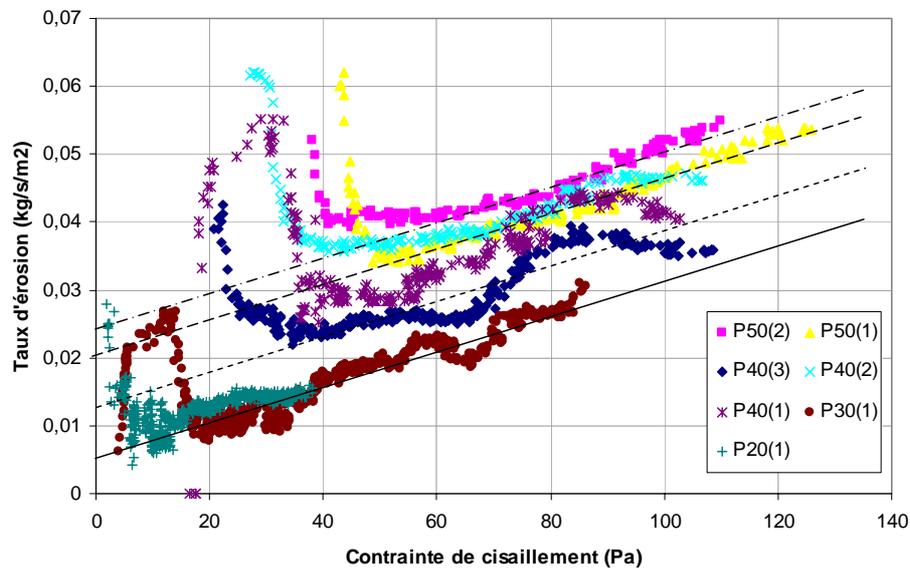


Figure 4-16 : Lois d'érosion de la texture K50S50 trouvée par la méthode de Wan et Fell

4.4 FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA LOI D'EROSION

Après avoir montré la pertinence de notre nouvelle approche de traitement des données (en particulier du signal de turbidité) sur une texture particulière, nous nous intéressons maintenant à généraliser cette approche à d'autres textures et à d'autres types d'argile.

4.4.1 Influence du pourcentage d'argile

La Figure 4-17 représente les données caractérisant la loi d'érosion obtenues pour des textures de sol sable-argile kaolinite avec des pourcentages différents en argile : 30, 50, 70 et 100%. À l'instar de ce qui a été observé précédemment pour le mélange K50S50, et pour chaque texture du sol, les résultats obtenus sont cohérents entre eux quelle que soit la pression appliquée et la durée de l'essai.

La Figure 4-18 regroupe l'ensemble des données d'érosion pour les différentes textures sur le même graphique. Y est également représenté un ajustement linéaire des données.

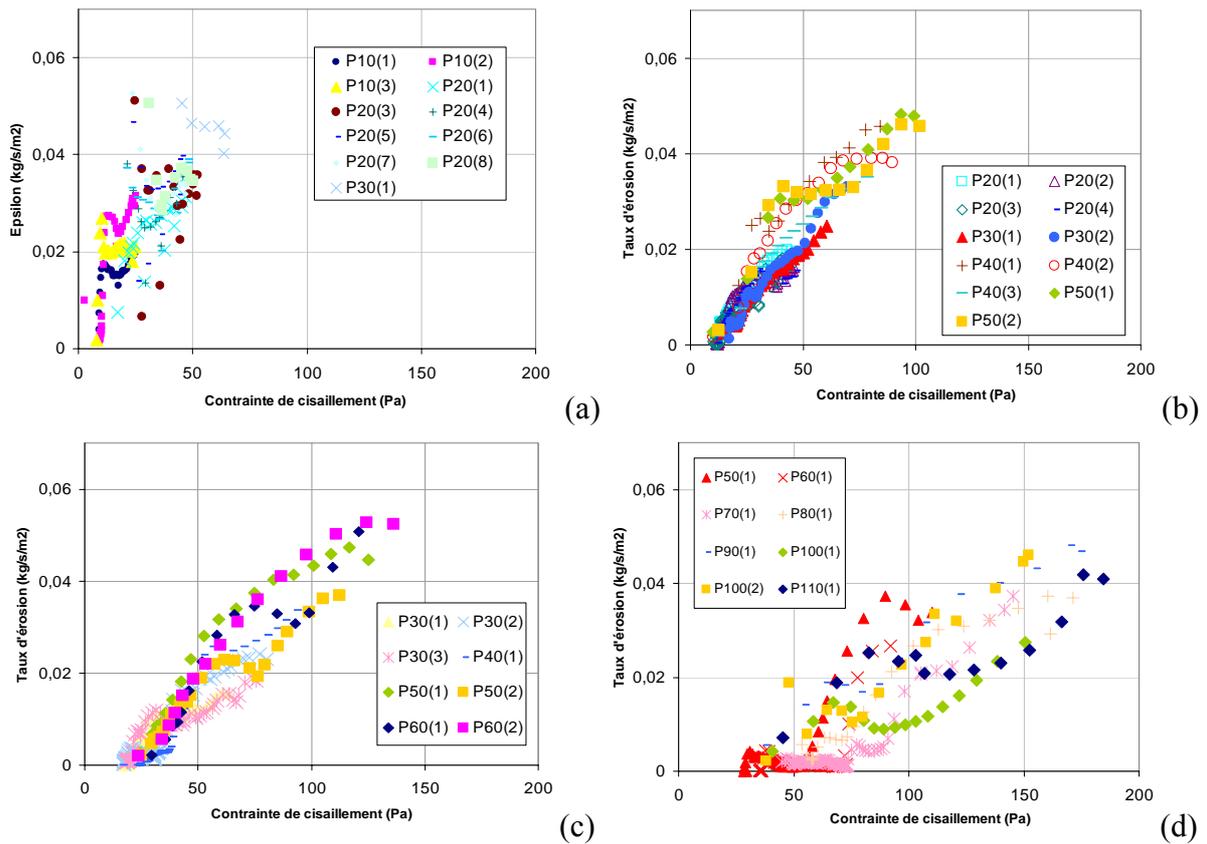


Figure 4-17 : Loi d'érosion des textures différentes (a) K30S70, (b) K50S50, (c) K70S30, (d) K100S0

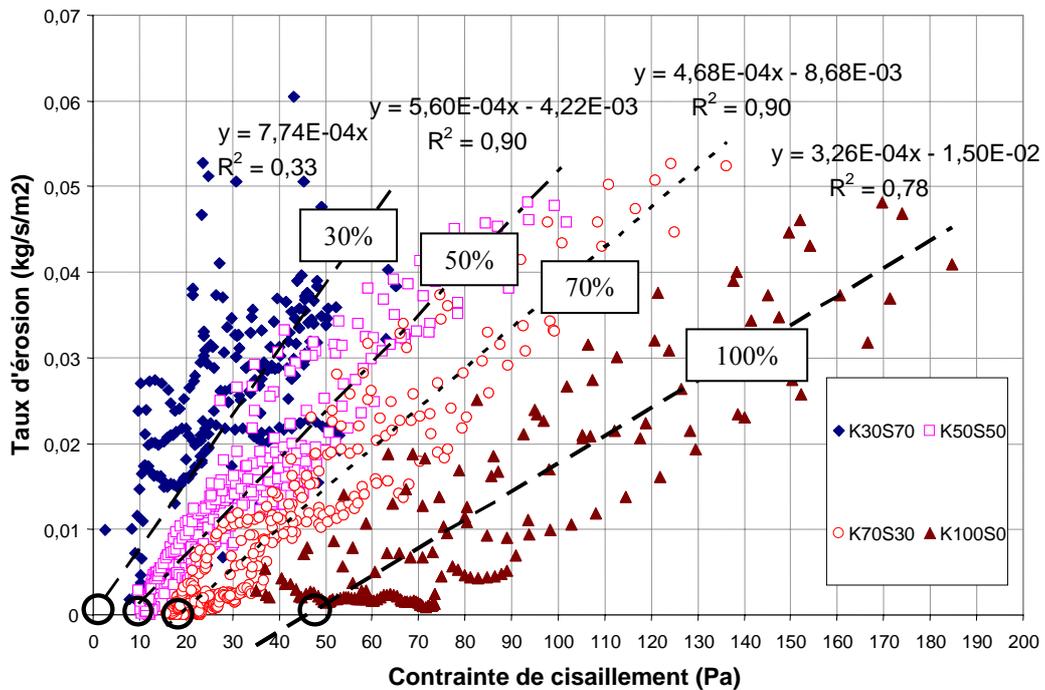


Figure 4-18 : Evolution de la loi d'érosion selon le pourcentage d'argile de type kaolinite

Selon la Figure 4-18, nous constatons que la contrainte de cisaillement critique τ_c augmente avec le pourcentage d'argile, tandis que le coefficient d'érosion k_{er} diminue plus doucement.

La Figure 4-19 récapitule les résultats. Nous trouvons des contraintes seuil typiques variant de 0 à 50 Pa et des taux d'érosion aux alentours de 5.10^{-4} s/m. Ce comportement est très similaire à celui observé par Reddi *et al.* (1997).

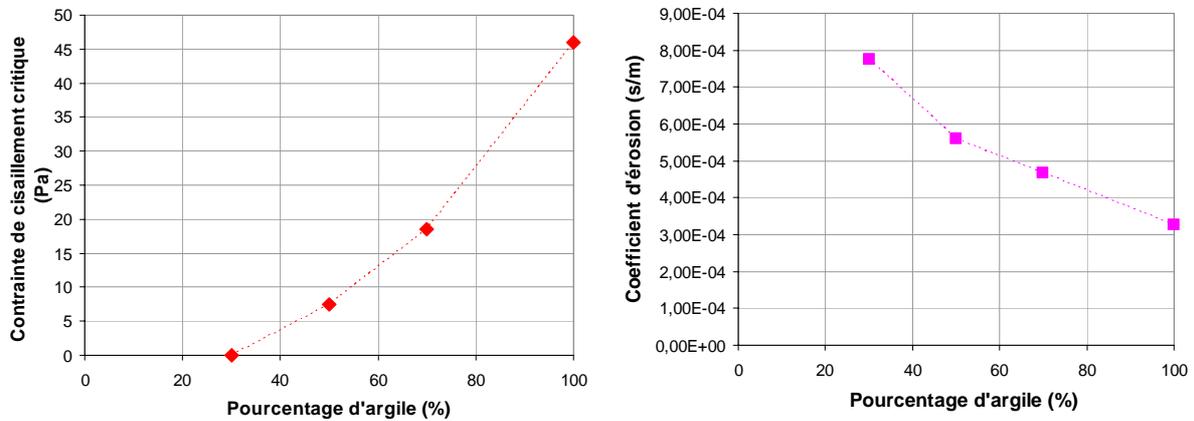


Figure 4-19 : Evolution de la contrainte de cisaillement critique et du coefficient d'érosion en fonction du pourcentage d'argile

4.4.2 Influence du type d'argile

Outre les textures à base d'argile Kaolinite d'autres mélange sable-argile ont été testés à l'essai d'érosion de trou : ceux réalisés à partir d'argile Illite et d'autres à partir d'argile Montmorillonite (Pitre, 2008).

4.4.2.1 Essais avec l'argile de type Illite

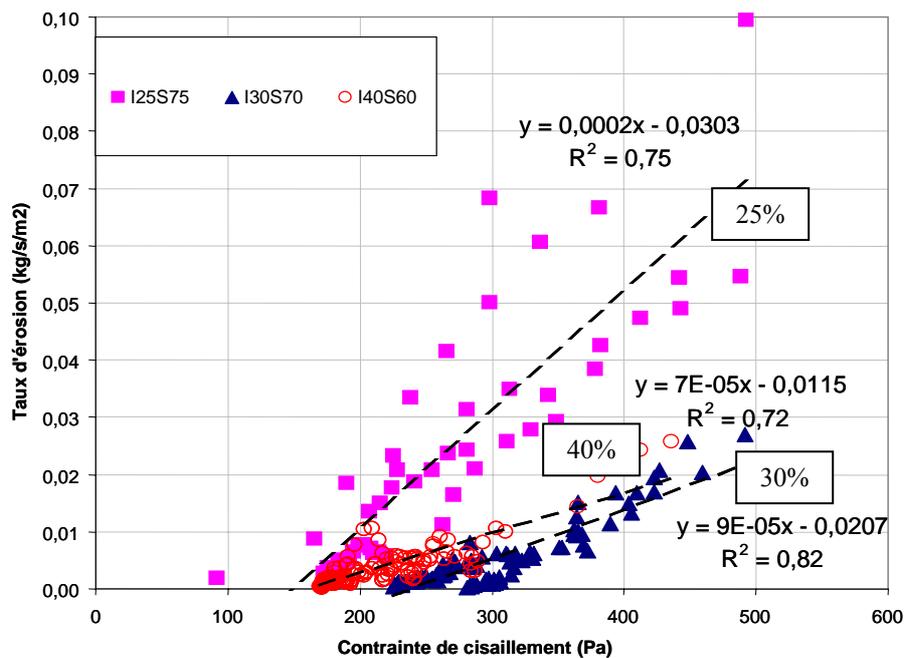


Figure 4-20 : Evolution de la loi d'érosion avec la fraction d'argile de type Illite

Les essais sur les textures à base d'argile Illite ont été plus difficiles à mener que les essais sur les textures à base de Kaolinite. En effet, l'érosion s'est révélée beaucoup plus difficile à obtenir en particulier pour les textures à plus de 40% d'argile. Ainsi seuls les essais sur textures à 25%, 30% et quelques essais à 40% ont pu être menés. La Figure 4-20 représente les lois d'érosion obtenues pour ces mélanges sable-argile Illite.

Nous observons que les matériaux sont effectivement beaucoup moins sensibles à l'érosion. Une teneur en Illite de 25% suffit ainsi à obtenir une contrainte seuil de l'ordre de 150Pa. Le comportement est donc très différent de celui des mélanges sable-Kaolinite où aucune contrainte seuil n'était observée pour la texture à 30% d'argile kaolinite.

Les coefficients d'érosion sont également plus faibles (d'environ un ordre de grandeur) dans les mélanges à base d'Illite comparés à ceux à base de Kaolinite.

L'Essai d'Erosion de Trou se révèle donc bien discriminant dans le cas présent puisque les différentes textures que ce soit à base de Kaolinite ou d'illite sont bien discernables entre elles.

4.4.2.2 Essais avec l'argile de type Montmorillonite

Nous avons mené des essais d'érosion de trou avec les sols composés de montmorillonite (30 ou 50% d'argile) mais aucun des essais n'a abouti à des résultats exploitables. La cause en est le caractère gonflant de la montmorillonite. En effet, à la fin de chaque essai, le trou percé dans l'éprouvette était bouché sur toute sa longueur par du matériau imbibé d'eau. Des cavités à l'amont et à l'aval de la cellule étaient souvent visibles, certainement induites par des turbulences à ses extrémités à l'arrêt de l'essai. Le phénomène de gonflement s'est également manifesté par un débord du sol aux extrémités de l'éprouvette (environ 5mm) malgré la présence des grilles (Figure 4-21).

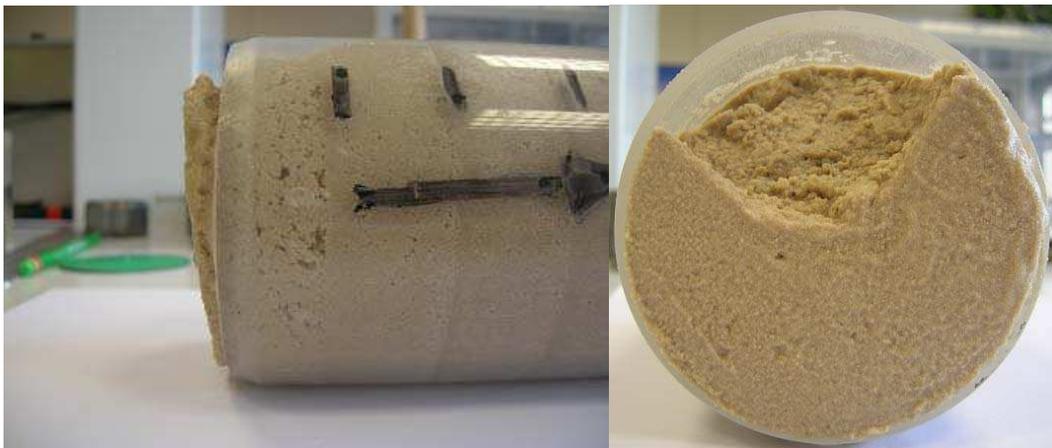


Figure 4-21 : Amont du trou de l'échantillon bouché par le gonflement et l'effondrement



Figure 4-22 : Vue de l'échantillon côté aval : le trou est bouché par le gonflement

Dans la Figure 4-22, nous voyons toujours l'empreinte du trou avec le sol boueux imbibé d'eau remplie. Le trou se bouche rapidement pendant la durée de l'essai, empêchant ainsi son érosion.

4.4.3 Conclusion partielle

Les essais menés avec le nouveau modèle d'interprétation ont permis de valider ce modèle. Une étude paramétrique portant sur les mélanges sable-argile a ainsi mis en évidence l'importance du pourcentage d'argile ainsi que de la nature de cette dernière. Les textures à base de Kaolinite sont assez facilement érodables et nous avons en particulier noté que la texture à 30% d'argile ne présente pas de contrainte seuil. Les textures à base d'Illite offre une résistance beaucoup plus importante à l'érosion et cela dès 25% d'argile tandis que les textures à base de Montmorillonite, gonflante, ne peuvent pas être testé dans le dispositif.

4.5 OBSERVATIONS MULTIECHELLES DES ECHANTILLONS AVANT ET APRES EROSION INTERNE

A la fin des essais de Hole Erosion Test, les éprouvettes ont été observées à différentes échelles. Dans un premier temps, nous avons souhaité regarder la forme du trou érodé. Pour cela, des moulages en cire ont été réalisés. La microscopie électronique à balayage environnementale a apporté des informations complémentaires à l'échelle microstructurale sur la texture et l'arrangement des particules dans les mélanges de sable, argile et limon (observation avant et après érosion).

4.5.1 Observation à l'aide de moulage en cire

Lorsque l'échantillon de sol érodé est sorti du dispositif de Hole Erosion Test, de la paraffine liquide est versée dans le trou élargi par l'érosion. L'échantillon est découpé pour sortir la « bougie » intacte ainsi créée. Cette dernière représente la forme du trou de l'éprouvette après l'érosion. La mesure du volume ou de la masse de la « bougie » permet de calculer le diamètre moyen final du trou érodé et la masse totale du sol érodé pendant l'essai. A partir de la prise de vue de la bougie (Figure 4-23a), les détails du profil du trou sont mis en évidence après un traitement de l'image (Figure 4-23b).

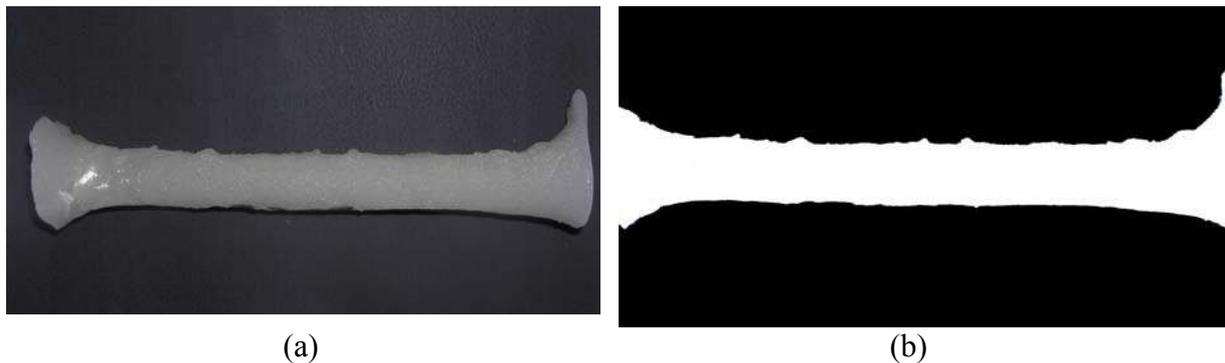


Figure 4-23. (a) Prise de vue de la 'bougie' à partir du trou érodé après un Essai d'Erosion de Trou sur la texture kaolinite 30% /sable 70% avec une différence de pression appliquée de 10mbar
(b) traitement de l'image (a)

Ces profils montrent notamment la présence d'élargissement à l'entrée du trou (coté gauche) et à la sortie du trou (coté droit). Hormis ces élargissements similaires quelle que soit la différence de pression appliquée (et qui sont reliés à l'entrée et à la sortie de l'eau dans l'échantillon à l'amont et à l'aval), le trou apparaît assez régulier avec un diamètre peu variable.

Une rugosité apparaît par contre sur la face supérieure des éprouvettes contrairement à la face inférieure qui semble plus lisse. Ce phénomène se répète pour des différences de pression plus élevées (Figure 4-24) et disparaît pour les pressions les plus élevées (au-delà de 50 mbar)

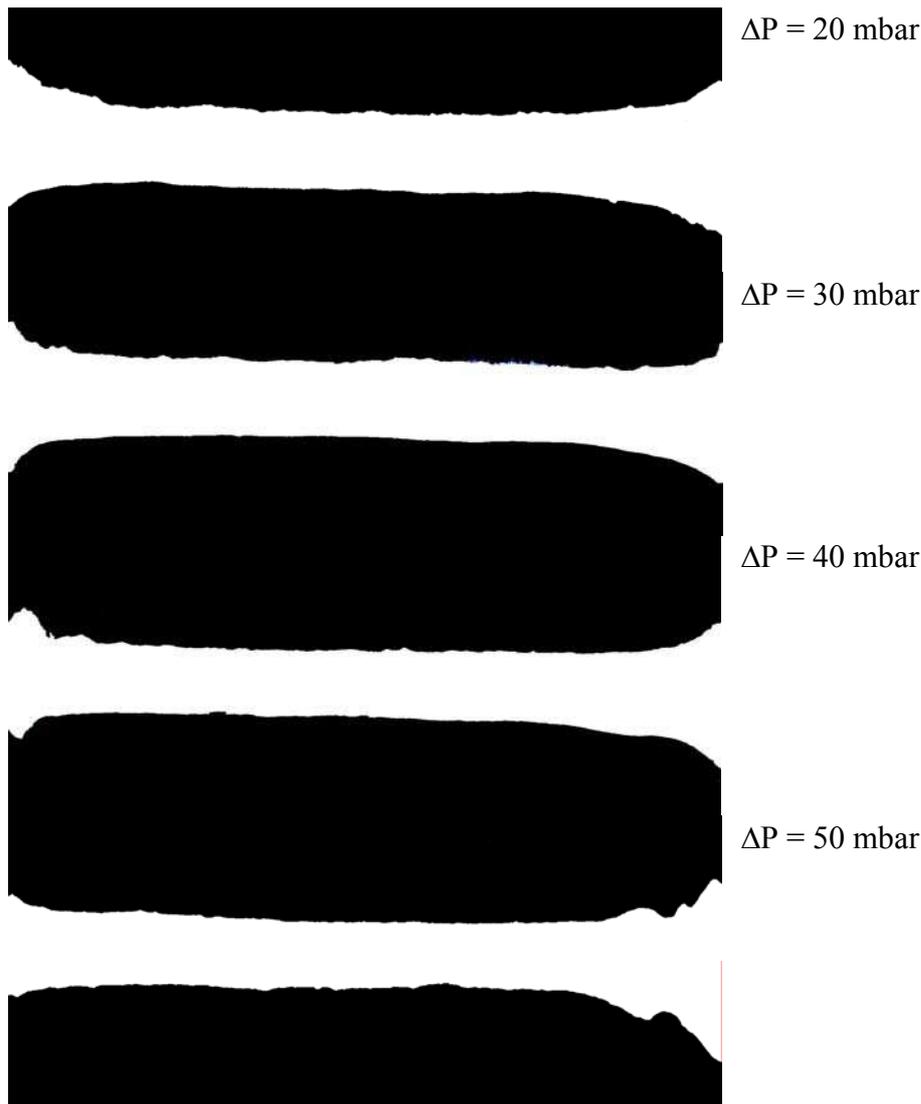


Figure 4-24. Prise de vue après traitement de la 'bougie' à partir du trou érodé après Essai d'Erosion de Trout sur la texture kaolinite 30% /sable 70% avec une différence de pression appliquée de 20, 30, 40 et 50 mbar respectivement.

Cet effet de rugosité est observé plus en détail avec le microscope électronique à balayage afin de mettre en évidence ses origines.

4.5.2 Observation avec le microscope électronique à balayage environnemental

La microscopie s'avère dans notre étude un complément intéressant pour comprendre les phénomènes qui se produisent dans les éprouvettes au cours de l'érosion. Elle permet ainsi l'observation des différences de texture d'une éprouvette à l'autre selon sa composition (sable, argile, limon), de mettre en évidence la présence de porosité ainsi que sa taille (en relation notamment avec le mode de compactage), de la cohésion entre les grains par l'observation des interfaces.... Nous avons par ailleurs profité de l'avantage du mode environnemental du microscope pour observer les textures encore humides, le séchage pouvant provoquer des modifications de la texture notamment avec du retrait ce qui perturbe les observations.

4.5.2.1 Généralités sur la microscopie électronique à balayage environnementale (MEBE)

Le microscope électronique à balayage est un appareil, pouvant fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide. Le microscope électronique à balayage utilisé au LCPC est un appareil de type Quanta 400 de chez FEI Company capable de travailler en mode environnemental. Il est couplé à un système de microanalyse EDX (energy dispersive X-ray) du fournisseur EDAX.

La microscopie électronique à balayage qu'elle soit environnementale ou classique est basée sur l'interaction entre un faisceau d'électrons et une matrice afin d'obtenir des informations sur son relief (topographie de surface, morphologie et agencement des particules) et sur sa composition chimique.

Le canon produit un faisceau d'électrons grâce à un filament (dans notre cas de tungstène) chauffé par un courant. Ce faisceau est accéléré par la haute tension (jusqu'à une tension de 500 V à 30 kV) créée entre le filament et l'anode. Il est ensuite focalisé sur l'échantillon par une série de 3 lentilles électromagnétiques. Le faisceau en touchant la surface de l'échantillon produit des interactions et donne des électrons secondaires capables de rendre compte de la topographie de surface des échantillons, des électrons rétro-diffusés capables de donner des indications qualitatives sur la composition chimique élémentaire de l'échantillon et des rayons X utilisés pour identifier et quantifier les éléments constitutifs de la matrice. Ces derniers sont analysés par la sonde EDX.

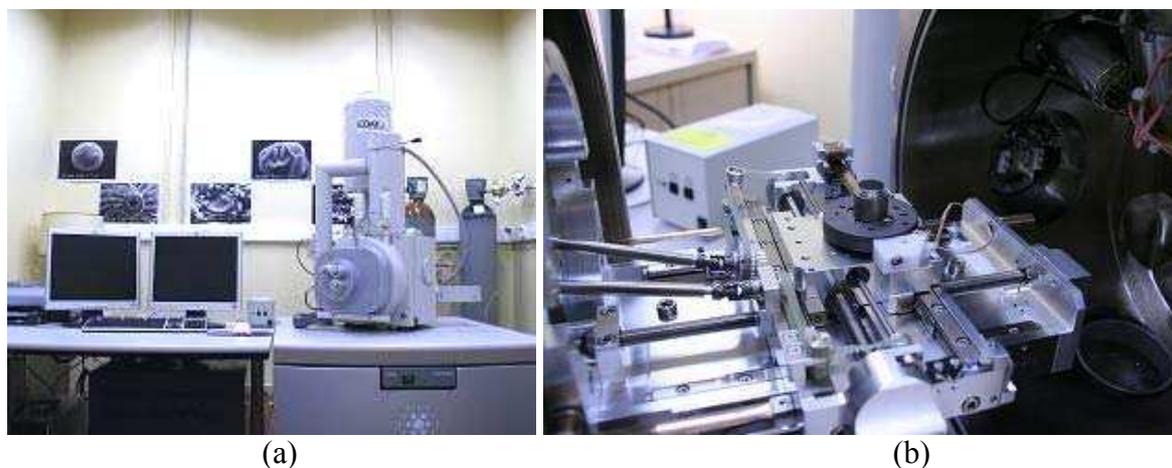


Figure 4-25. (a) Microscopie électronique à balayage environnemental à balayage Quanta 400 de chez FEI Compagny et (b) sa chambre d'analyse avec platine motorisée où est positionné l'échantillon.

Lorsque le microscope électronique est utilisé en mode environnemental ou en mode bas vide (Figure 4-26), des molécules d'eau envahissent la chambre d'analyse (avec une pression variable). Sous l'effet des électrons du faisceau primaire, les molécules d'eau s'ionisent (elles deviennent positives) et permettent de compenser les effets de charge en surface des échantillons et donc l'observation des matériaux sans une métallisation préliminaire. Il est donc possible d'observer des échantillons encore humides sans préparation d'aucune sorte.

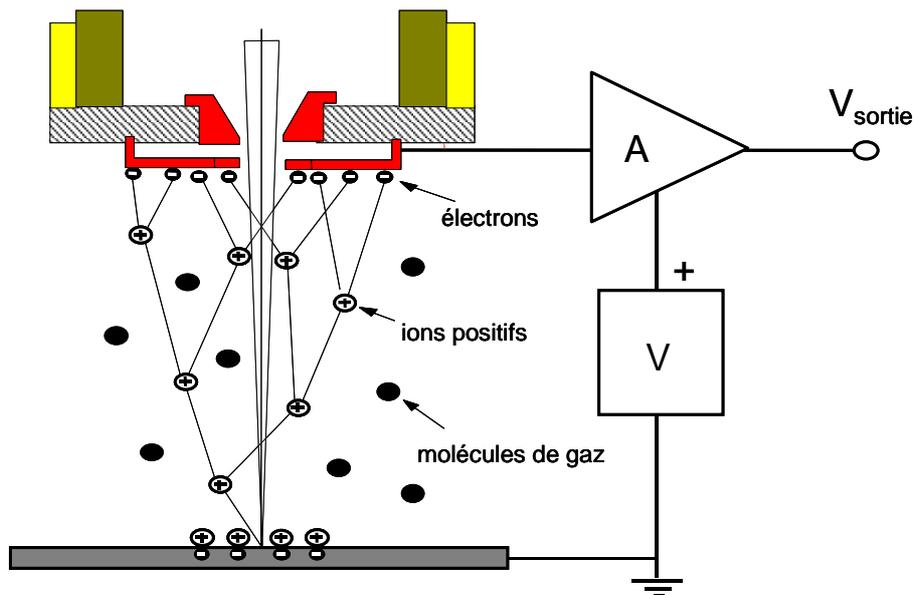


Figure 4-26. Schéma du processus d'ionisation des molécules d'eau permettant l'observation des échantillons en mode environnemental ou bas vide dans un MEBE.

4.5.2.2 Observations des liaisons entre le sable et les argiles de type kaolinite ou illite

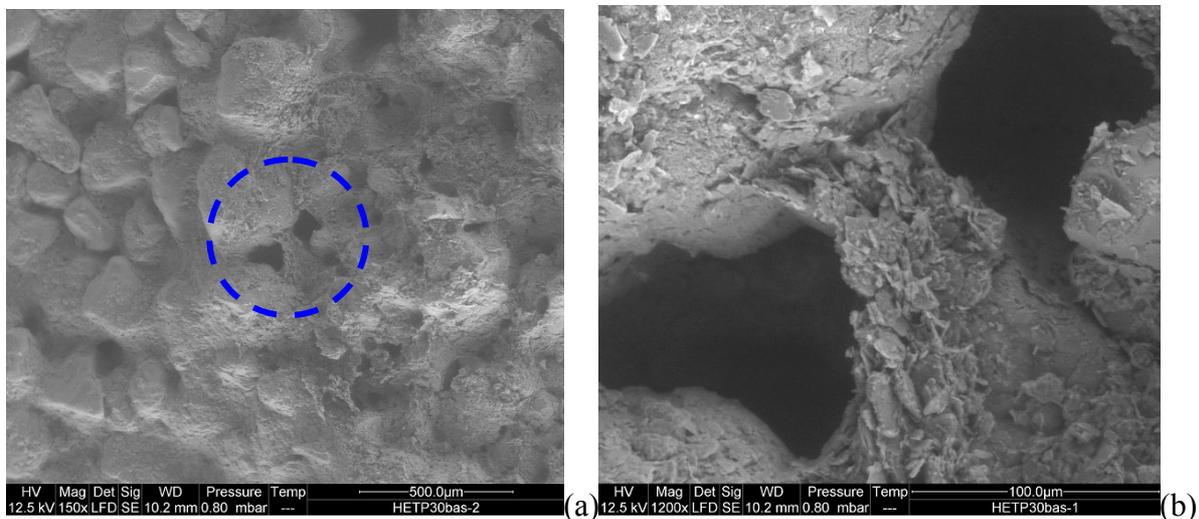


Figure 4-27 : (a) Observation de la texture sable 70% / kaolinite 30%, (b) Observation d'un exemple de liaison entre les grains de sable assurée par des particules kaolinitiques

Les textures sable/argile observées sont composées des particules argileuses de petites tailles sous la forme de feuillets empilés ou de plaquettes et de grain de sable de tailles supérieures avec des surfaces lisses et des arêtes arrondies. La Figure 4-27a représente l'une de ces textures composée de 70% de sable et de 30% de kaolinite. Avec des tailles très petites, les particules argileuses ont une surface spécifique beaucoup plus importante que celle des particules sableuses. En présence d'eau, l'argile joue le rôle du ciment entre les grains de

sable. La cohésion dans la texture est directement liée aux liaisons entre les grains. La Figure 4-27b montre par exemple une liaison entre des grains de sables par un pont argileux. Ce ciment argileux à base de kaolinite se présente sous la forme de particules (plaquettes) qu'il est possible de discerner de manière nette contrairement aux particules d'illite qui compose le ciment entre les particules de sable, comme représenté sur Figure 4-28. Le ciment illitique apparaît beaucoup plus compact et cohésif que le ciment formé par les particules de kaolinite ce qui se traduit par une perméabilité beaucoup plus faible des échantillons composés d'illite et par conséquent une propension plus faible à gonfler (voir les courbes de gonflement/affaissement obtenues avec le nouvel essai d'émiettage dans le chapitre 5 sur les texture sable /illite).

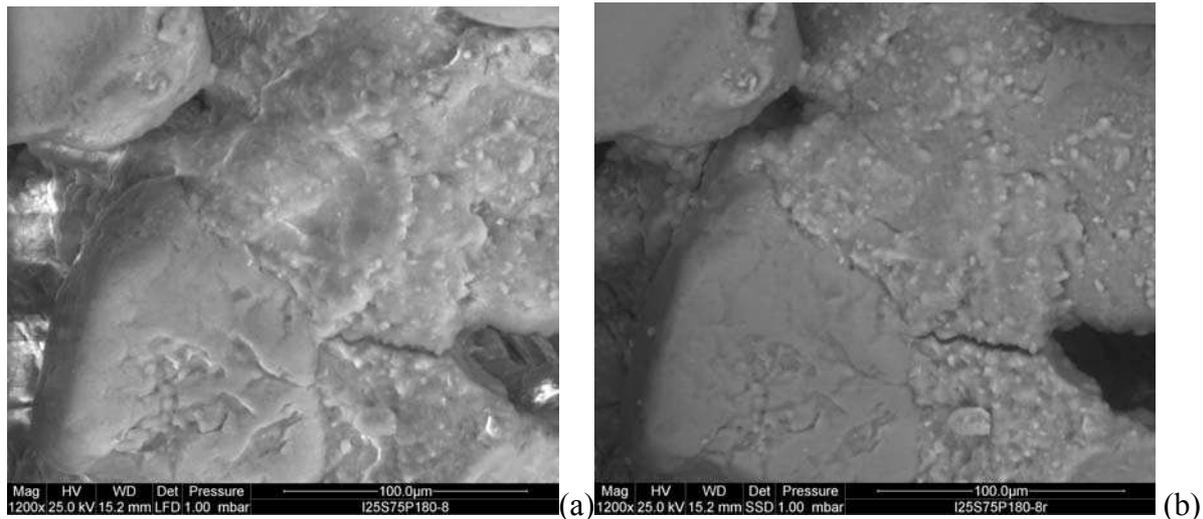


Figure 4-28. (a) Observation de la texture sable 75% / illite 25% en mode électrons secondaires (contraste topographique), (b) Observation de la même zone que (a) en mode électrons rétrodiffusés (contraste chimique).

Les textures composées de montmorillonite n'ont pas été observées compte tenu qu'il est impossible de réaliser avec elles des essais de HET avec le protocole employé jusqu'à présent.

4.5.2.3 Influence du gradient hydraulique imposé sur l'évolution de la texture sableuse d'un échantillon au cours d'un essai de HET

La surface du trou préformé dans une éprouvette composée de 30% de kaolinite et de 70% de sable a été observée avant érosion et après érosion. L'influence du gradient hydraulique a pu ainsi être mise en évidence en comparant les essais avec $\Delta P = 10\text{mbar}$ et $\Delta P = 30\text{ mbar}$. Nous avons également observé la différence de rugosité sur la surface supérieure et inférieure du trou que nous avons remarqué sur les moulages en cire macroscopique, consécutive à différents modes d'arrachement des particules

A partir des Figure 4-29 et Figure 4-30, nous observons de manière nette la différence d'aspect entre les faces supérieures et inférieures. Pour une différence de pression appliquée de 30 mbar, les grains de sable sont arrachés de la surface supérieure, ils sédimentent sur la face inférieure puis sont charriés par le fluide ce qui se traduit par un phénomène d'abrasion de la face inférieure où sont présents en quantité des grains de sable qui sont désolidarisés de la matrice. A l'inverse, la face supérieure paraît plus accidentée mais également plus argileuse avec l'apparition de 'trous' correspondant à des empreintes (Figure 4-31) où se trouvaient

initialement des grains de sable avant leur arrachement. La texture paraît également peu compacte avec la présence d'une porosité qui facilite la pénétration de l'eau dans l'échantillon. Cette porosité est liée à la présence de bulles d'air emprisonnée lors du compactage de l'échantillon et à la composition de la texture elle-même. En effet, l'argile n'est pas en quantité suffisante – ou est proche de l'être – pour combler les espaces entre les grains de sable qui se touchent.

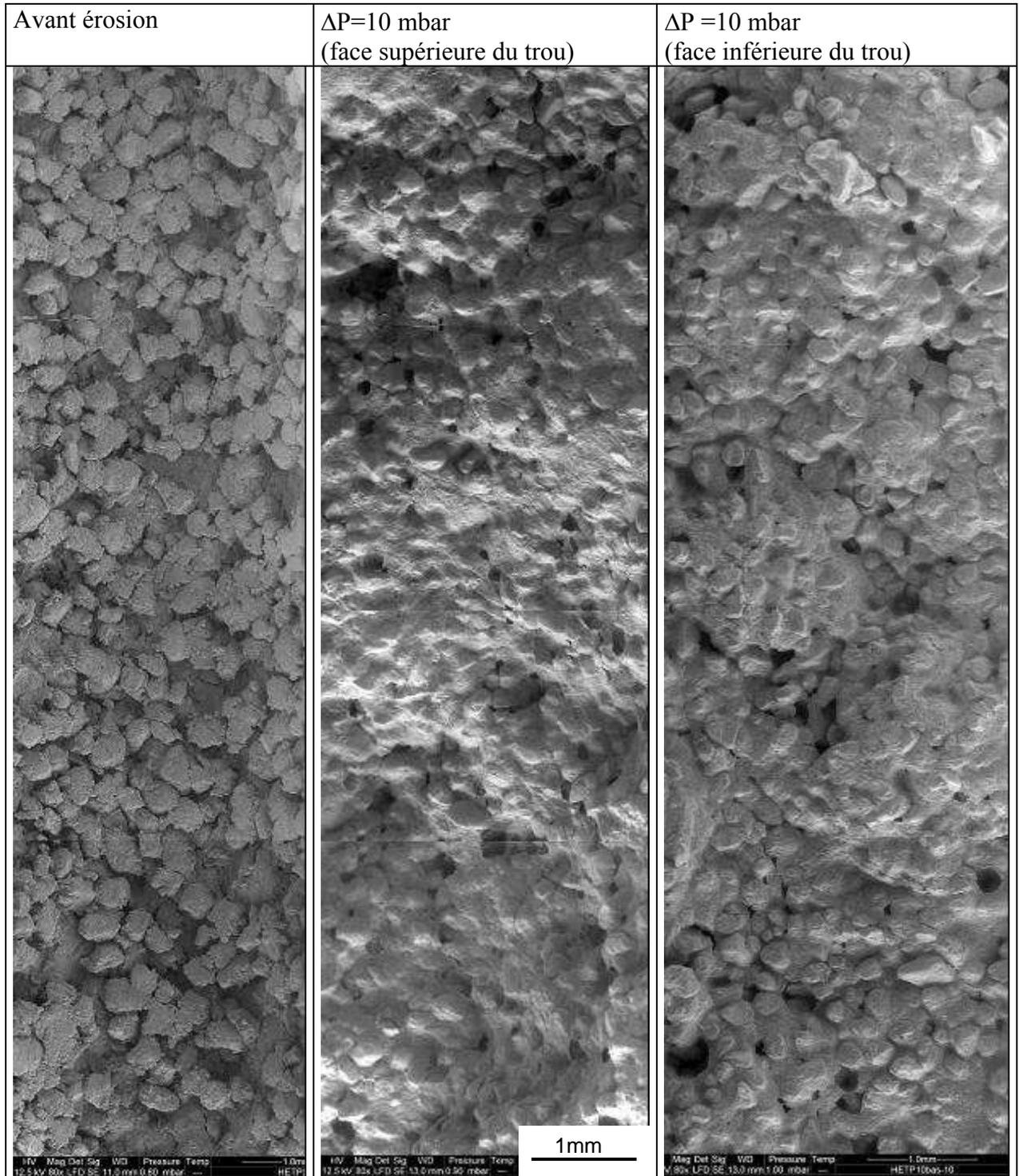


Figure 4-29. Observation des faces supérieures et inférieures du trou érodé avec une différence de pression appliquée de 10 mbar dans une éprouvette de texture 70% de sable et 30% de kaolinite.
Avant érosion : pas de différences entre les faces supérieure et inférieure.

Pour une différence de pression appliquée plus faible, les surfaces paraissent moins accidentées compte tenu que le phénomène d'abrasion sur la face inférieure du trou doit être moins intense. La face supérieure demeure toujours plus argileuse avec des empreintes de grains de sable qui ont été arrachés. Pour des différences de pressions supérieures à 50 mbar, la force d'entraînement du fluide doit être suffisante pour que les faces supérieures et inférieures des échantillons ne soient plus différenciées.

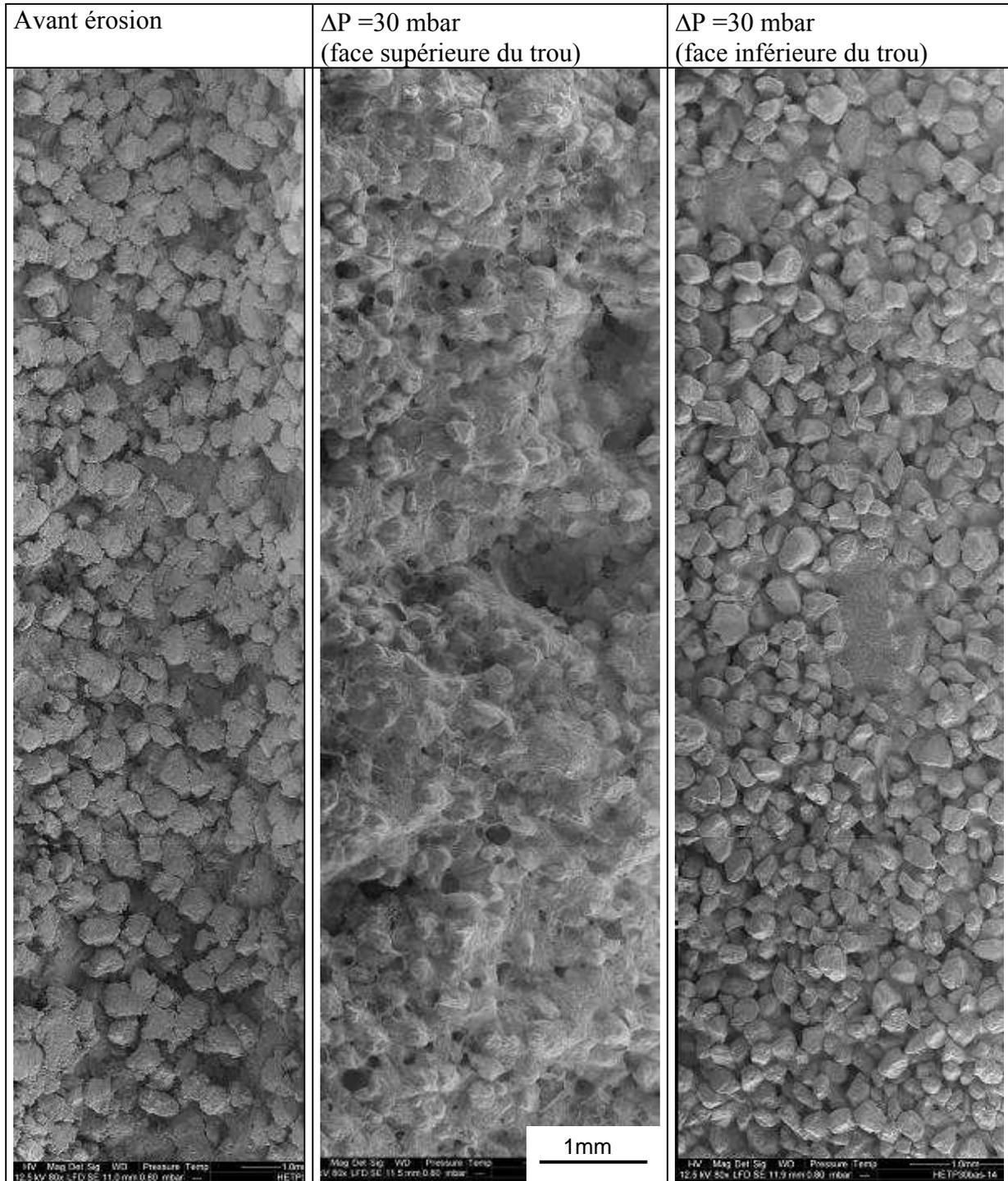


Figure 4-30. Observation des faces supérieures et inférieures du trou érodé avec une différence de pression appliquée de 30 mbar dans une éprouvette de texture 70% de sable et 30% de kaolinite.
Avant érosion : pas de différences entre les faces supérieure et inférieure.

L'observation de la surface du trou initial avant érosion est, quant à elle, faussée car on observe seulement les effets de l'outil qui a servi au préalable à faire le trou. La couche superficielle du trou est remaniée avec des particules arrachées encore présentes dans le trou et qui sont emportées dès les premières minutes de l'essai de HET.

4.5.2.4 Comparaison des textures sableuses contenant de la kaolinite ou de l'illite

A partir des Figure 4-31 (surface du trou avant et après érosion de la texture 30% kaolinite / 70% sable) et Figure 4-32 (surface du trou avant et après érosion de la texture 25% illite et 75% de sable), la cohésion entre les grains de la texture à base d'illite semble plus importante. En effet, cette texture ne présente pas d'empreinte de grains arrachés sur sa face supérieure. Cela illustre pourquoi la contrainte de cisaillement critique de la texture contenant de l'illite est beaucoup plus élevée que celle de la texture avec la kaolinite.

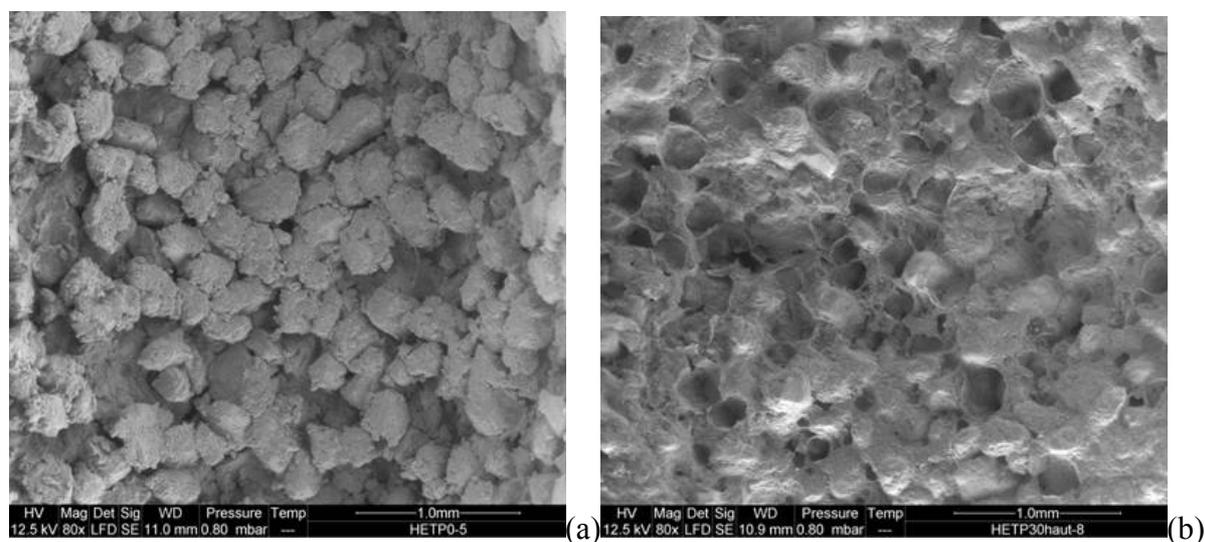


Figure 4-31 : Surface du trou (a) avant l'érosion, (b) après l'érosion de la texture K30S70

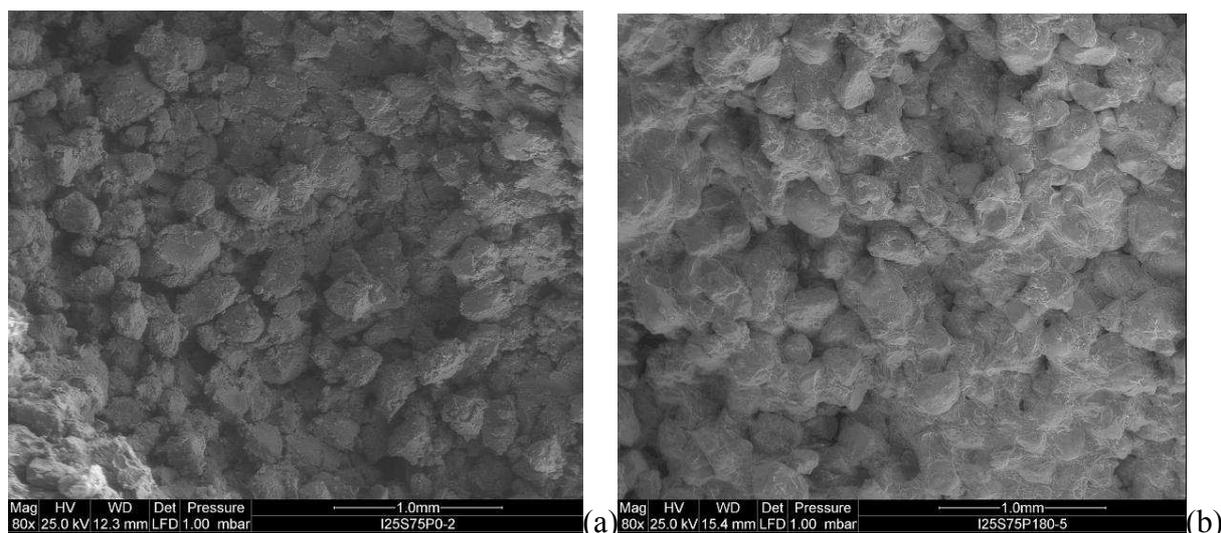


Figure 4-32 : Surface du trou (a) avant l'érosion, (b) après l'érosion de la texture I25S75

4.5.2.5 Comparaison des textures argileuse contenant de la kaolinite ou de l'illite

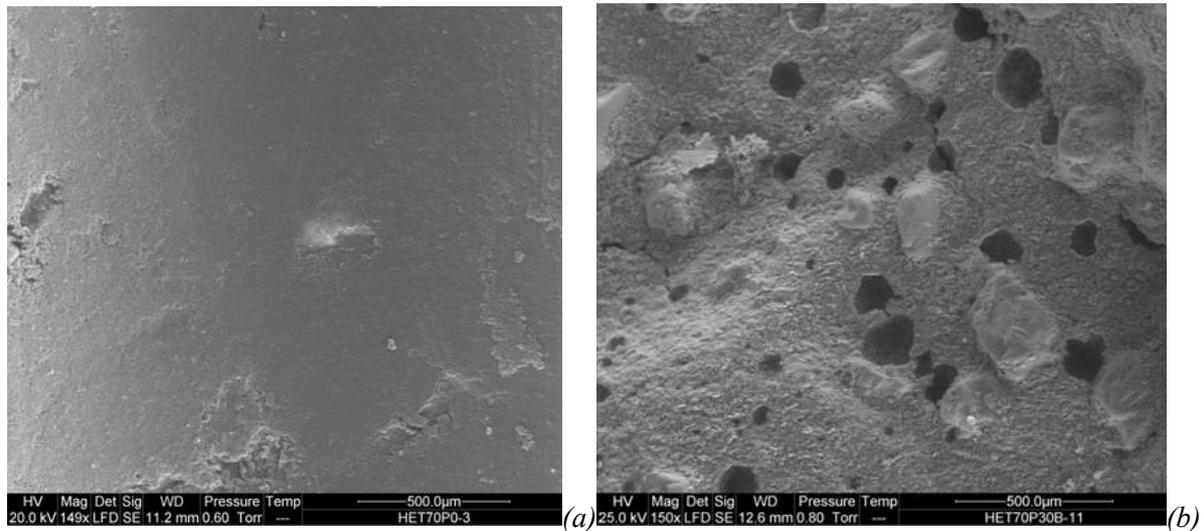


Figure 4-33 : Surface du trou (a) avant l'érosion, (b) après l'érosion de la texture K70S30

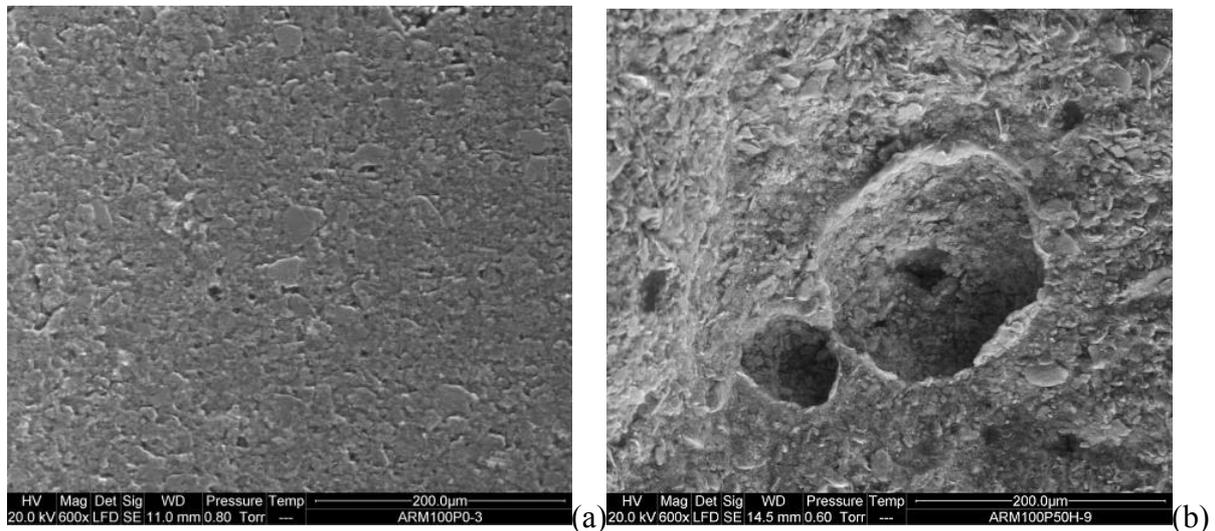


Figure 4-34 : Surface du trou (a) avant l'érosion, (b) après l'érosion de la texture K100S0

La Figure 4-33 montre la surface du trou avant et après l'érosion de la texture 70% d'argile de type kaolinite et 30% de sable. Avant érosion, on remarque l'aspect très lisse de la surface du trou car les particules d'argiles ont été orientées (Figure 4-34) par l'outil servant à faire le trou. Les grains de sable semblent avoir été repoussés vers l'intérieur de l'échantillon. Après l'érosion, la surface du trou est marquée par des empreintes de grains de sable détachés de la matrice mais également par celles des bulles d'air initialement emprisonnées. Ces résultats sont en accord avec les observations réalisées sur l'échantillon d'illite pure (Figure 4-34) où les empreintes observées sont dues seulement à la présence de bulles d'air.

Enfin la comparaison des textures comportant de l'illite avant et après érosion (Figure 4-35 et Figure 4-36), confirme que l'érosion des textures argileuses avec de l'illite est différente de celle qui s'opère en présence de kaolinite. L'augmentation de la quantité d'illite entraîne une fermeture de la porosité et la création d'une matrice qui cimente les grains de sable de plus en plus fortement.

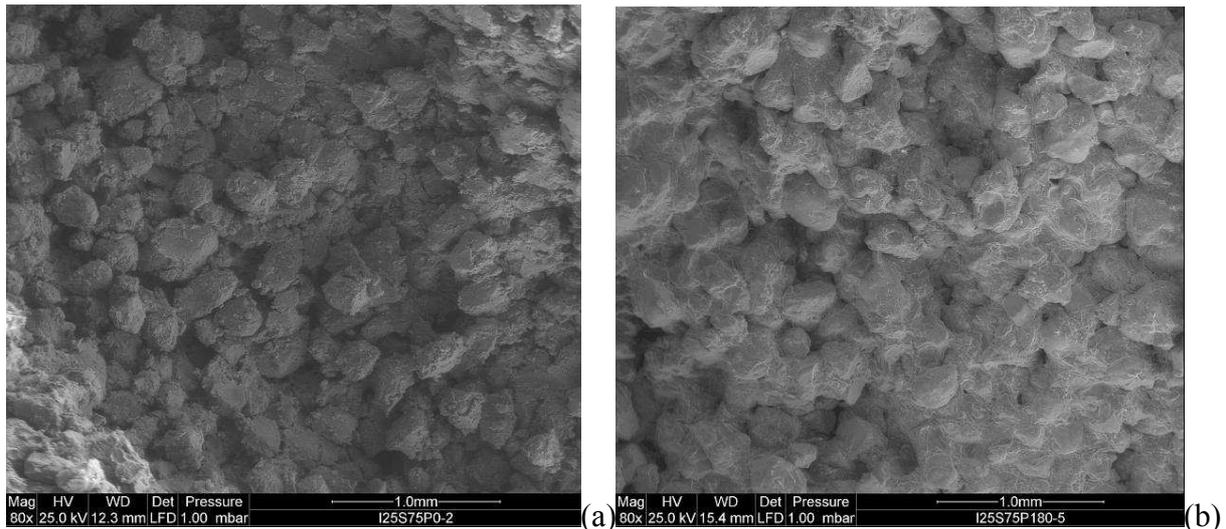


Figure 4-35 : Surface du trou (a) avant l'érosion, (b) après l'érosion de la texture I25S75

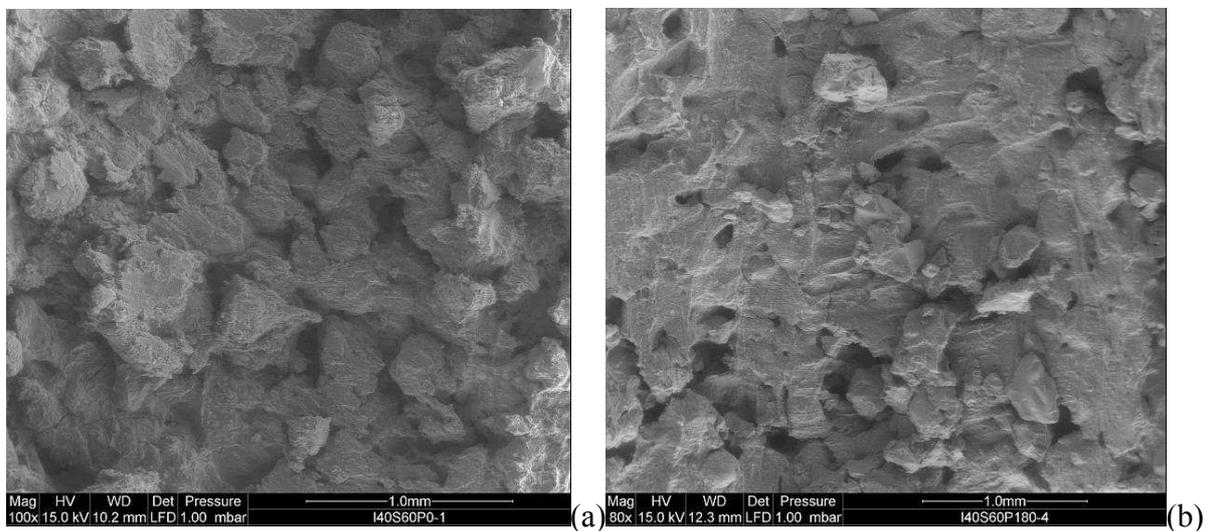


Figure 4-36 : Surface du trou (a) avant l'érosion, (b) après l'érosion de la texture I40S60

Au cours de l'ensemble des observations nous n'avons pas observé de particules d'argiles isolées détachées ou d'amas argileux voir des agrégats mixtes argiles/sables demeurés dans le trou. Aussi, il est difficile de statuer sur le mode d'arrachement des particules. Compte tenu de la présence des empreintes de grains, l'hypothèse d'un arrachement progressif des particules fines une à une jusqu'au 'descellement' d'un grain de sable est avancée. Un suivi de la granulométrie des grains arrachés à l'instant t au cours de l'essai donnerait sans doute des indications pour répondre à cette question.

4.6 CONCLUSIONS

Nous nous sommes intéressés, dans ce chapitre, à la caractérisation de la sensibilité à l'érosion des sols à l'aide de l'Essai d'Erosion de Trou (HET).

Partant de l'appareil et des différentes mesures réalisées lors de notre protocole d'essai, nous avons établi et validé un nouveau modèle d'interprétation utilisant le signal de turbidité et permettant, pour la première fois dans ce type d'essai, de calculer les quantités caractérisant l'essai (contrainte de cisaillement et taux d'érosion) sans avoir à supposer des lois d'écoulement dans l'échantillon.

Des essais systématiques ont ensuite été menés sur des mélanges sable-argile. La teneur en argile ainsi que la nature des argiles ont été variés.

Notre étude a permis de construire des lois d'érosion linéaires pour les mélanges à base de Kaolinite et en partie pour les mélanges à base d'Illite. Les paramètres tels que contraintes seuil et taux d'érosion ont alors été estimés pour caractériser la sensibilité à l'érosion des différentes textures.

Les mélanges à base d'argile Montmorillonite n'ont pu être testés. Le matériau gonflant, nous en avons conclu que l'Essai d'Erosion de Trou n'est pas adapté pour ces types de texture.

Une approche multi-échelle du trou formé après érosion a finalement permis de lier les observations macroscopiques à la dynamique apparente d'érosion au niveau du trou.

Chapitre 5 : Caractérisation de la dispersion

Le phénomène d'érosion est étroitement lié à la présence de particules fines (notamment argileuses) dans le sol. La dispersion correspond alors au processus de défloculation c'est-à-dire que les particules se détachent les unes des autres dans le milieu aqueux. Ce phénomène n'entraîne pas systématiquement d'importantes modifications du volume solide mais s'accompagne généralement d'une augmentation de la perméabilité et d'une perte de cohésion globale.

Afin de caractériser le rôle de la fraction argileuse dans les phénomènes d'érosion, notre démarche a consisté à combiner essais recommandés dans la littérature tels que le « Pinhole Test » (norme ASTM D4647-93), le « Crumb Test » (norme ASTM D6572-00) et le « Double Hydrometer Test » (norme ASTM D4221-99) et également un nouvel essai de dispersion : essai d'émiettement ou « Crumb Test modifié » et des mesures avec la zétamétrie. Les différents types d'essais nous permettent d'étudier le phénomène de dispersion de l'échelle macroscopique à microscopique.

5.1 ESSAIS CLASSIQUES : RESULTATS ET LIMITES

Dans cette partie, nous avons appliqué les essais normalisés de dispersion à nos textures de référence (cf. chapitre 2). Ces essais sont recommandés pour des mélanges particulièrement argileux, et avec des fractions argileuses très sensibles à l'eau ce qui n'est pas le cas de toutes nos textures. L'intérêt de procéder à ces essais est de voir dans quelle mesure une modification des protocoles permettrait une extension du domaine d'application des différents essais.

5.1.1 Essai à l'aiguille : « Pinhole Test »

Le « Pinhole Test » est l'un des essais de dispersion étudiés au cours de ce travail. Parmi les essais de caractérisation de la sensibilité d'un sol à la dispersion, le « Pinhole Test » est considéré comme le plus fiable (Sherard *et al.*, 1976a ; 1976b ; Mitchell et Soga, 2005). L'essai consiste à faire écouler de l'eau distillée dans un petit trou de 1mm de diamètre préformé dans l'échantillon. La charge hydraulique est appliquée par paliers pendant une durée déterminée. La durée globale d'un essai est de 25 minutes. La classification du sol en terme de dispersivité 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.

Le « Pinhole Test » a été utilisé sur les textures de références détaillées au Chapitre 2. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 5-1.

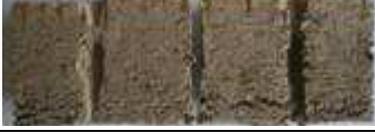
Tableau 5-1 : Résultats de dispersion des différentes textures de sol à l'aide du « Pinhole Test »

Texture	Charge (cm)	Temps (min)	Débit (ml/s)	Couleur de l'eau	Diamètre moyen du trou final (mm)	Niveau de dispersion
1 Sableuse	5	5	1,5	légèrement sombre	22	D1
	5	10	1,7	légèrement sombre		
	10	5	2,3	légèrement sombre		
	38	5	3	sombre		
2 Limonosableuse	5	5	0,8	légèrement sombre	21	D2
	5	10	1	claire		
	18	5	1,5	légèrement sombre		
	38	5	2,3	très sombre		
3 Limonosableuse	5	5	0,5	sombre	18	D1
	5	10	0,6	légèrement sombre		
	18	5	0,7	légèrement sombre		
	38	5	0,8	légèrement sombre		
4 Sablo-argileuse	5	5	0,6	claire	14	ND3
	5	10	0,7	claire		
	18	5	0,9	claire		
	38	5	1,9	claire		
5 Argile sableuse	5	5	0,8	légèrement sombre	7	ND4
	5	10	0,9	claire		
	18	5	1,4	claire		
	38	5	2,2	claire		
6 Argilolimoneuse	5	5	0,2	légèrement sombre	8	ND3
	5	10	0,2	légèrement sombre		
	18	5	1	légèrement sombre		
	38	5	2,1	légèrement sombre		
7 Argileuse	5	5	0,2	légèrement sombre	6	ND2
	5	10	0,4	légèrement sombre		
	18	5	0,4	légèrement sombre		
	38	5	1,5	claire		
8 Argileuse	5	5	0,2	claire	3	ND2
	5	10	0,1	claire		
	18	5	0,2	légèrement sombre		
	38	5	0,7	légèrement sombre		

Dans cet essai, les trois textures de sol classées comme dispersives sont la texture sableuse (texture 1), la texture limono-sableuse (texture 2) et la texture limono-argileuse (texture 3). Les autres textures sont classées non dispersives ou légèrement dispersives. Les résultats restent cependant toujours qualitatifs.

Dans le but d'obtenir des résultats plus quantitatifs, nous avons ajouté une mesure complémentaire dans le protocole d'essai c'est-à-dire la mesure de la masse de sol érodée. Les résultats de ces mesures complémentaires sont présentés dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2 : Résultats de dispersion de différentes textures de « Pinhole Test ».

Texture	Forme du trou à la fin de l'essai	Diamètre moyen du trou final (mm)	Masse de sol érodé (g)
1 Sableuse		22	28,2
2 Limo-sableuse		21	24,6
3 Limo-argileuse		18	17,0
4 Sablo-argileuse		14	10,4
5 Argilo-sableuse		7	2,8
6 Argilo-limoneuse		8	3,3
7 Argileuse		6	4,7
8 Argileuse		3	0,4

La masse de sol érodée évolue d'une texture à l'autre : les textures argileuses (textures 5, 6, 7, 8) ont les masses érodées les plus faibles tandis que les textures sableuses (textures 1, 4) et limoneuses (texture 2, 3) ont les masses érodées les plus importantes. Les photos du diamètre final du trou en fin d'essai selon les textures dans le Tableau 5-2 sont en accord avec ce résultat. En d'autres termes, plus le sol est argileux, moins il s'érode. En effet, la masse érodée du sol à l'aide du « Pinhole Test » semble reliée directement au pourcentage d'argile contenue dans la texture du sol comme le montre la Figure 5-1.

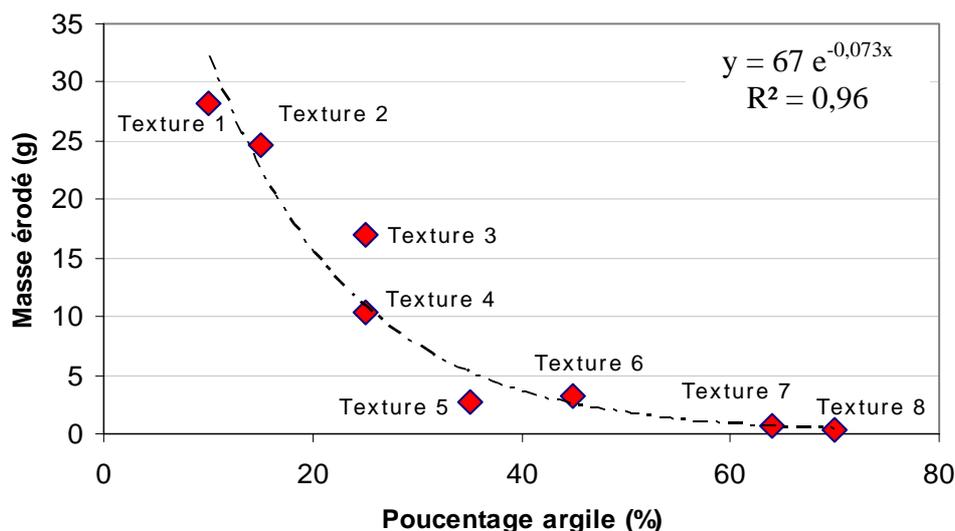


Figure 5-1 : Masse érodée en fonction du pourcentage d'argile

En conclusion, le « Pinhole Test » apparaît comme un essai de base assez performant (par rapport au crumb test normalisé que nous verrons par la suite) car il est en mesure de distinguer l'aspect dispersif ou non des textures testées (3 d'entre elles sont dispersives à des niveaux différents alors que les 5 autres sont trouvées non dispersives). Cependant, les résultats restent malgré tout qualitatifs. La mesure d'un paramètre supplémentaire tel que la masse de sol érodé en fin d'essai améliore la sensibilité du test. Elle permet de mettre à jour plus clairement une relation entre la quantité d'argile présente dans la texture et les propriétés de dispersion du mélange. Dans ce test où l'action extérieure exercée sur le sol peut être qualifiée de 'mécanique', plus le sol est argileux, moins il est dispersif (arrachement des particules sous l'effet d'un fluide en mouvement).

5.1.2 Essai d'émiettage : « Crumb Test »

Le « Crumb Test » est un essai normalisé (norme ASTM D 6572-00). C'est le deuxième essai de dispersion que nous avons choisi de tester (Samb, 2006). Il s'agit d'un essai simple à effectuer qui ne demande pas d'appareillage complexe ou coûteux, ou de matériel spécial.

Le protocole d'essai et la préparation de l'échantillon pour le « Crumb Test » normalisé sont rappelés dans un premier temps. Un petit échantillon en forme de cube de 15 mm de côté est placé dans un récipient contenant un grand volume d'eau distillée (250 ml). Selon le degré de turbidité du nuage de la suspension colloïdale formée, le sol est classé dans un des quatre niveaux de dispersion :

- niveau 1 - non dispersif ;
- niveau 2 - intermédiaire ;
- niveau 3 - dispersif ;
- niveau 4 - très dispersif.

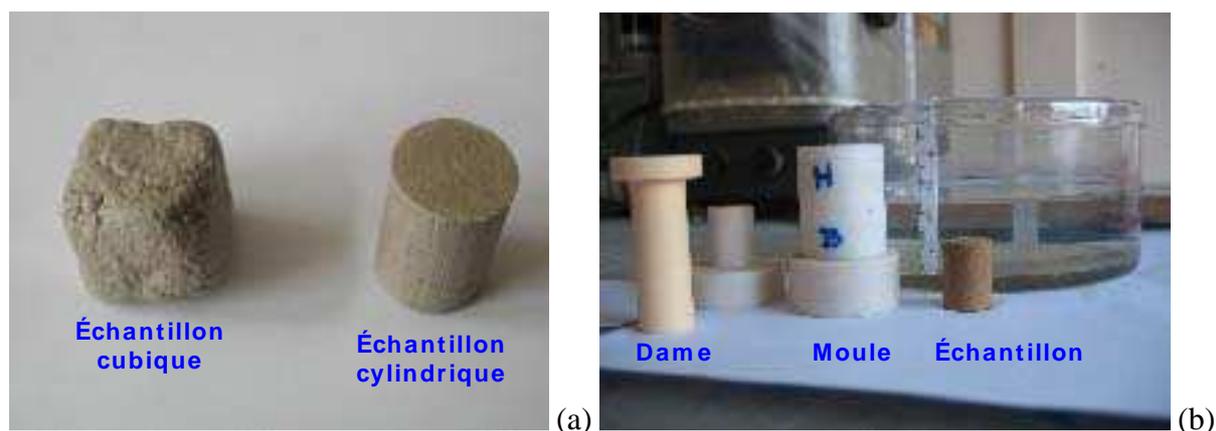


Figure 5-2: (a) : Comparaison de l'échantillon cubique et cylindrique ; (b) : moule et dame utilisée pour reconstituer l'échantillon cylindrique

5.1.2.1 Résultats

Les premiers essais réalisés avec des éprouvettes cubiques de 15 mm de côté et préparées manuellement ont porté sur les textures sablo-argileuse (texture 4) et limono-argileuse (texture 3). Trois échantillons ont été testés pour chacune des textures.

Les résultats sont montrés dans le Tableau 5-3. Pendant toute la durée des essais, l'eau reste assez claire et ne présente pas de trouble. Les textures de sol testées sont classées dans le niveau 1 (non dispersif) à chacun des essais de répétitivité.

Tableau 5-3 : Résultats du « Crumb Test » avec l'échantillon cubique

No	Texture	2 minutes	1 h	Niveau de dispersion
4	Sablo-argileuse			1
3	Limono-argileuse			1

Cependant, nous constatons que lors de la préparation des échantillons, ces derniers sont difficiles à manipuler. Il est probable que ce soit relié au fait que la teneur en eau imposée (teneur en eau correspondant à 95% de l'Optimum Proctor Normal) est inférieure à la limite de plasticité du sol. D'autre part, la forme cubique de l'échantillon ne se prête pas à un compactage manuel dans de bonnes conditions. Le compactage est effectué sur deux plans perpendiculaires qui correspondent aux côtés adjacents du cube. En conséquence, le matériau

se fissure légèrement et est fragilisé lors de la fabrication de l'éprouvette. De plus, la préparation de l'éprouvette doit être effectuée dans un temps assez court afin de limiter l'évaporation de l'eau. Il est difficile dans ces conditions d'obtenir une taille de cube exacte (15 mm de côté). Les facettes des cubes réalisés sont irrégulières et les côtés ont des dimensions différentes (Figure 5-2a). Par ailleurs, la préparation manuelle donne des résultats sensiblement différents d'un opérateur à l'autre étant donné que pour chaque opérateur les dimensions de l'éprouvette ainsi que le degré de compactage diffèrent.

Pour ces différentes raisons, les essais de Crumb Test se sont poursuivis avec des échantillons cylindriques de même volume (hauteur de 20 mm, diamètre de 15 mm). Compte tenu de la variabilité des dimensions d'éprouvette fabriquée et des conditions de compactage lorsque la préparation utilise uniquement les mains comme outils, un moule cylindrique a été utilisé (Figure 5-2.b). Les résultats du « Crumb Test » après cette modification (Tableau 5-4) permettent de valider ce nouveau protocole. Huit textures de sol ont été testées.

Avec la modification du protocole pour fabriquer l'échantillon, nous n'avons plus rencontré de difficulté pour avoir des échantillons et des résultats reproductibles. Pourtant malgré cette amélioration, les résultats restent qualitatifs car la classification parmi les niveaux de dispersion dans l'essai du « Crumb Test » se base sur l'observation visuelle. Or, les degrés de turbidité des nuages formés par la mise en suspension des particules des différentes textures de sol ne sont pas très différents. Une exception pourtant, les textures sableuses (texture 1), limono-sableuses (texture 2) et limono-argileuses (texture 3) après 2 minutes de contact avec l'eau se désagrègent (dispersent) plus rapidement que les autres textures.

Par ailleurs, avec ce protocole d'essai, le « Crumb Test » ne permet pas de distinguer les différences de dispersion avec les différents temps de mesure (lecture de l'essai après 2min, 1h et 6h de contact avec l'eau) et entre les différentes textures. Toutes les textures de sol sont classées dans le même niveau c'est-à-dire le niveau 1 (non dispersif).

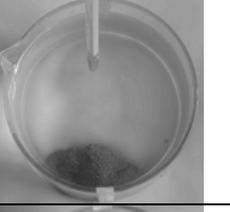
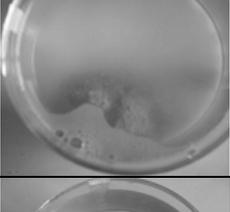
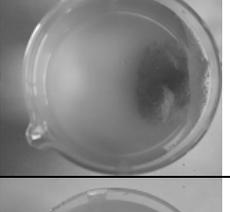
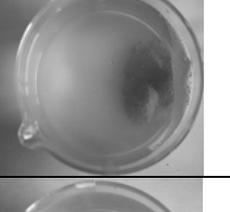
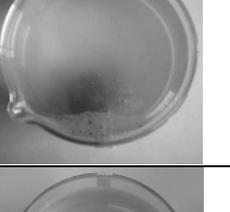
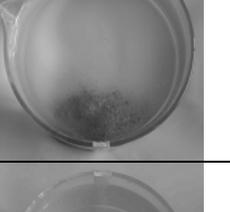
Une autre raison peut expliquer cette incapacité de l'essai à discerner les différences de susceptibilité des textures à la dispersion : le « Crumb Test » est un essai recommandé pour caractériser les sols ayant un indice de plasticité (I_p) supérieur à 8 tandis que cet indice pour les huit textures étudiées est inférieur à cette valeur. Avec nos textures de sol, le « Crumb Test » a atteint sa limite et ne permet donc pas de les classer.

5.1.2.2 Conclusions

Le « Crumb Test » est un essai simple à réaliser et facile à reproduire cependant il est limité par la plasticité des échantillons testés (le domaine d'application de l'essai se limite aux sols avec un $I_p > 8$). Cet essai ne permet pas dans notre cas de différencier le caractère dispersif ou non des textures de sol choisies dans cette étude.

L'essai du « Crumb Test » donne néanmoins des idées pour développer un nouvel essai de dispersion du sol plus performant. Ce nouvel essai que nous appellerons « nouvel essai d'émiettage » ou « Crumb Test » amélioré sera présenté dans la partie 5.2.

Tableau 5-4 : Résultats du « Crumb Test » avec l'échantillon cylindrique

Texture	2 minutes	1 h	6 h	Niveau de dispersion
1 Sableuse				1
2 Limono- sableuse				1
3 Limono- argileuse				1
4 Sablo- argileuse				1
5 Argilo- sableuse				1
6 Argilo- limoneuse				1
7 Argileuse				1
8 Argileuse				1

5.1.3 Essai de sédimentométrie en parallèle : « Double Hydrometer Test »

Les études portant sur l'érosion et la dispersion des sols montrent que les particules fines (<5 µm) jouent un rôle significatif. L'idée de la méthode utilisée dans le « Double Hydrometer Test » (norme ASTM D6572-00) 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. Le degré de dispersion du sol est calculé selon la formule suivante :

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

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 flocculée en condition normale (sans agent dispersant et sans agitation mécanique) dans l'eau.

Tableau 5-5 : Classification de la dispersion du sol (Sherard et al., 1976a)

% Dispersion	Etat du sol
$D < 30 \%$	non dispersif (ND)
$30 \% < D < 60 \%$	probablement dispersif (PD)
$D > 60 \%$	dispersif (D)

La méthodologie de l'essai est présentée dans le chapitre 1. La préparation des suspensions est réalisée de la manière suivante : les textures de sols sont préparées de manière similaire à celles qui sont prévues pour les tests d'érosion interne ou externe c'est-à-dire que les matériaux sont mélangés à sec puis de l'eau du robinet est ajoutée pour atteindre 95 % de la teneur en eau de l'Optimum Proctor Normal. Après 24 h d'hydratation protégés dans une enceinte hermétique, les mélanges (40g) sont dispersés dans 500 mL de solution d'hexamétophosphate de sodium (6%) et dans l'eau distillée respectivement. On laisse les suspensions 24h puis ces suspensions sont agitées mécaniquement avant d'être versées dans des éprouvettes où leur volume est ajusté jusqu'à 2 L avec de l'eau distillée. Les éprouvettes sont agitées manuellement puis les mesures sont effectuées avec le densimètre en fonction du temps pour déterminer la fraction de particules <5µm.

Le Tableau 5-6 présente les résultats de l'essai du « Double Hydrometer Test » pour les différentes textures de référence. Est également indiqué sur le tableau, le pourcentage de passant initial dans le mélange qui correspond à la fraction passante à 5 µm présente dans le limon et l'argile constituant les différentes textures.

Tableau 5-6 : Résultats de l'essai du « Double Hydrometer Test »

N°	Texture	% passant 5 μm			%D	Niveau de dispersion
		initial	avec défloculant (B)	sans défloculant (A)		
1	Sableuse	11	8	0	0	non dispersif (ND)
2	Limono-sableuse	22	14	0	0	non dispersif (ND)
3	Limono-argileuse	32	25	0	0	non dispersif (ND)
4	Sablo-argileuse	19	19	6	32	probablement dispersif (PD)
5	Argilo-sableuse	31	28	8	28	non dispersif (ND)
6	Argilo-limoneuse	42	37	15	41	probablement dispersif (PD)
7	Argileuse	48	45	37	83	dispersif (D)
8	Argileuse	57	40	31	78	dispersif (D)
9	Argileuse pure	70	70	60	86	dispersif (D)

Nous constatons que, pour toutes les textures, ce pourcentage initial est toujours supérieur au pourcentage de passant à 5 μm lorsque la texture reconstituée est mise en présence d'un défloculant. Il est donc vraisemblable que, même en présence de dispersant, une partie des particules fines reste floculée (probablement retenues avec des particules plus grosses).

Selon la norme ASTM, les textures sableuses et limoneuses (texture 1, 2, 3) sont non-dispersives tandis que les textures argileuses (4, 5, 6, 7, 8) sont dispersives ou probablement dispersives. Il apparaît également qu'à l'inverse du pinhole test (au sens de 'sensibilité à l'arrachement mécanique des particules par un fluide') le niveau de dispersion (au sens de 'sensibilité à l'action d'un défloculant') augmente avec le pourcentage d'argile dans le mélange (Figure 5-3).

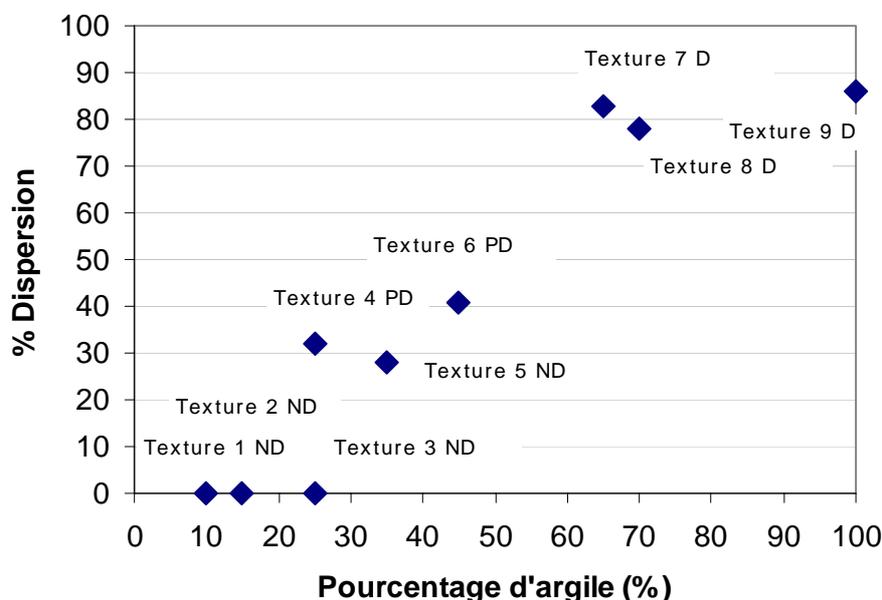


Figure 5-3 : Evolution de la dispersion du sol avec le pourcentage d'argile

5.1.3.1 Interprétation des résultats et discussion

Pour comprendre les résultats de l'essai du « Double Hydrometer Test », et notamment l'augmentation de la dispersion avec le pourcentage d'argile, nous proposons un modèle d'interprétation simple basé sur le comportement des particules argileuses en solution.

Nous considérons d'abord que les sols sont constitués de trois types de particules (correspondant aux trois classes de sol) en solution :

- des particules sableuses de diamètre typique (D_{50}) noté D_S ($\sim 180\mu\text{m}$),
- des particules limoneuses de diamètre typique (D_{50}) noté D_L ($\sim 15\mu\text{m}$),
- des particules argileuses de diamètre typique (D_{50}) noté d_A ($\sim 3\mu\text{m}$).

Les masses volumiques des différentes particules sont considérées comme identiques et nous pouvons donc identifier fraction massique et fraction volumique. Les fractions volumiques sont notées f_S, f_L , et f_A ($f_S + f_L + f_A = 1$).

Nous supposons ensuite qu'en présence de grosses particules (sable ou limon), les particules argileuses viennent préférentiellement flocculer (s'accoler) à leur périphérie formant une couche d'argile d'épaisseur moyenne d_A (Figure 5-4).

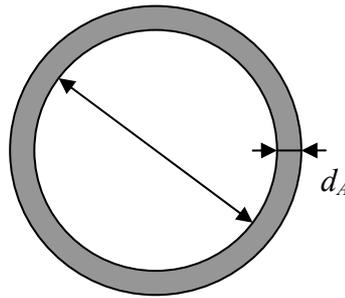


Figure 5-4 : Particule grossière (sable ou limon) entourée d'une couche d'argile

Cette flocculation est responsable de la captation d'une partie de l'argile présente dans la texture. Nous pouvons estimer cette fraction en considérant la densité volumique φ d'argile dans la couche. Du fait de l'encombrement des particules argileuses, nous pouvons, en première approche, supposer $0,5 < \varphi < 0,7$. Nous avons alors la fraction volumique maximale d'argile captée par le sable f_{A-S} ou par le limon f_{A-L} :

$$f_{A-G} = \frac{\pi D_G^2 \varphi d_A}{\frac{1}{6} \pi D_G^3} f_G = 6 \varphi \frac{d_A}{D_G} f_G \quad \text{avec } G = S \text{ ou } L$$

La fraction d'argile restante est alors :

$$f_{A_rest} = \max(0, f_A - f_{A-S} - f_{A-L})$$

Considérant, d'une part, que cette fraction argileuse restante se comporte de la même manière que l'argile pure (texture 9 du Tableau 5-6), d'autre part qu'il n'y a plus de fraction limoneuse

libre plus petite que $5\mu\text{m}$ (du fait de la floculation avec l'argile), nous en déduisons que la fraction passante à $5\mu\text{m}$ sans défloculant de la texture considérée s'exprime :

$$f_{\text{passant}} = 0,6 f_{A_rest}$$

La Figure 5-5 représente le pourcentage de passante à $5\mu\text{m}$ sans défloculant mesuré et calculé selon le modèle pour les différentes textures.

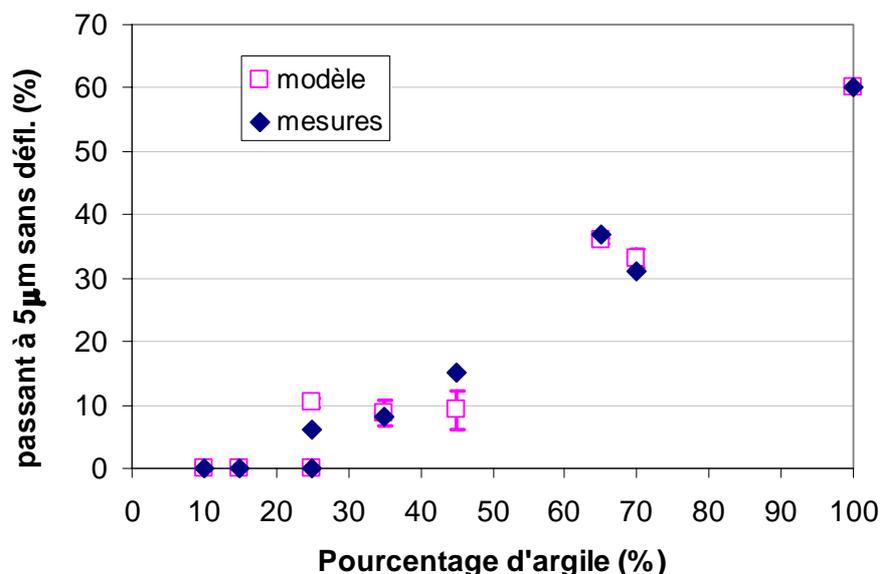


Figure 5-5 : Passant à $5\mu\text{m}$ sans défloculant: comparaison du modèle et des valeurs mesurées. Les points et les barres d'erreur correspondant au modèle sont obtenus avec $\varphi = 0,6 \pm 0,1$.

Bien qu'assez simple, le modèle proposé ici permet donc de bien rendre compte des observations expérimentales. C'est en particulier le cas pour les textures les moins argileuses où nous trouvons que l'ensemble de la fraction fine est capté par les particules de sable et de limon.

Remarquons que nous n'avons pas représenté, dans le cadre de ce modèle, le pourcentage de dispersion tel que tracé Figure 5-3. La raison en est que, comme nous l'avons remarqué précédemment, une partie du passant à $5\mu\text{m}$ semble restée captive du mélange même en présence de défloculant. Considérant cela, l'approche proposée ici paraît suffisante et représenter le pourcentage de dispersion n'est pas forcément pertinent.

5.1.3.2 Conclusions

L'essai du « Double Hydrometer Test » propose une manière de mesurer la dispersion d'un sol. Parmi les huit textures testées, le degré de dispersion du sol semble dépendre de la fraction d'argile dans le sol. Plus le sol est argileux, plus il est naturellement dispersif au sens chimique. Rappelons que dans le cas du pinhole test, plus le sol est argileux, moins il est dispersif au sens mécanique.

5.1.4 Synthèse des résultats des essais classiques

Nous avons résumé dans le Tableau 5-7 les résultats de dispersion obtenus sur les différentes textures de sol étudiées au moyen des essais normalisés de type « Double Hydrometer Test », du « Crumb Test » et du « Pinhole Test ». Le « Crumb Test » ne permet pas de distinguer plusieurs classes de dispersion parmi les différentes textures contrairement au « Double Hydrometer Test » et au « Pinhole Test ». Ces deux essais ne donnent cependant pas la même tendance à la dispersion pour une même texture. Cela vient du fait que la dispersion n'est pas définie de la même manière pour chacun de ces essais : dispersion au sens mécanique pour le pinhole test et dispersion en présence d'un défloculant pour le double hydrometer test. Il est par conséquent nécessaire de développer un nouvel essai qui soit en mesure de distinguer plus clairement la tendance à la dispersion d'un sol et pour cela, les résultats doivent se baser sur des mesures quantitatives.

Tableau 5-7 : Comparaison des résultats de dispersion entre les trois types d'essai

N°	Texture	Pinhole Test (solicitation mécanique)	Crumb Test (stabilité)	Double Hydrometer Test (action chimique)
1	Sableuse	dispersif	non dispersif	non dispersif
2	Limono-sableuse	dispersif	non dispersif	non dispersif
3	Limono-argileuse	dispersif	non dispersif	non dispersif
4	Sablo-argileux	légèrement dispersif	non dispersif	probablement dispersif
5	Argilo-sableuse	modérément dispersif	non dispersif	non dispersif
6	Argilo-limoneuse	légèrement dispersif	non dispersif	probablement dispersif
7	Argileuse	non dispersif	non dispersif	dispersif
8	Argileuse	non dispersif	non dispersif	dispersif

5.2 NOUVEL ESSAI DE D'EMIETTAGE (« CRUMB TEST » AMELIORE)

Comme nous l'avons présenté précédemment, le « Crumb test » est un essai simple, rapide et pratique qui peut être utilisé aussi bien en laboratoire que sur site. C'est un essai aisément répétable (une fois le protocole de préparation des échantillons modifié) mais avec des capacités limitées car son interprétation n'est basée que sur des observations visuelles. Les résultats obtenus sont de caractère qualitatif. Une modification de l'appareillage et l'amélioration du protocole d'essai nous permettent cependant d'avoir des résultats quantitatifs et une meilleure caractérisation de la dispersion des sols (Samb, 2006). Nous nous intéressons, en particulier, à la caractérisation de cette dispersion selon la texture du sol ainsi qu'aux facteurs influençant le processus de dispersion.

5.2.1 Du « Crumb Test » normalisé au nouvel essai d'émiettement

Préparation de l'échantillon

La préparation de l'échantillon préconisée dans le « Crumb test » présente un certain nombre de difficultés et de limites de répétitivité ou de reproductibilité que nous avons détaillées précédemment dans la partie 5.1.2. Le nouvel essai d'émiettement va contourner ces difficultés en utilisant des échantillons cylindriques de volume donné compacté dans un moule cylindrique (1,5 cm de diamètre, 2 cm de hauteur) (Figure 5-2). Par ailleurs, l'échantillon est placé au milieu du récipient (au lieu du bord du récipient) pour éviter les effets de bord.

Modification de l'appareillage

Si, dans le « Crumb test », l'observation visuelle s'avère adaptée pour obtenir une classification qualitative des sols, elle n'est pas suffisante pour obtenir des résultats quantitatifs. Pour améliorer les mesures et les rendre plus répétables, nous avons mis au point un appareillage qui nous permet de mesurer le gonflement et l'affaissement de l'échantillon au cours du temps (Figure 5-6). Un palpeur est utilisé pour mesurer le gonflement ou l'affaissement du sol tandis qu'une cible positionnée au fond du récipient sert à mesurer l'élargissement de l'échantillon de sol au cours de sa désagrégation. Cette cible permet d'évaluer le diamètre de l'échantillon à sa base.

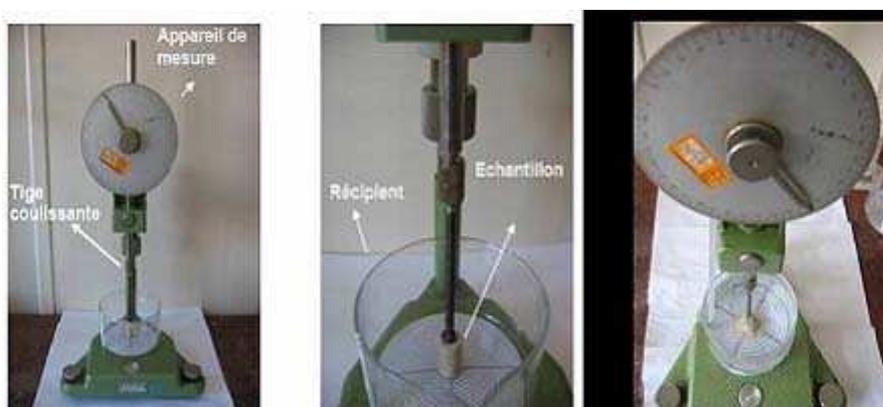


Figure 5-6 : Dispositif de mesure du nouvel essai d'émiettement

Protocole d'essai

Les essais ont été réalisés avec les mêmes textures de sol que les essais d'érosion pour pouvoir comparer les résultats des essais d'érosion et de dispersion.

Les mesures sont effectuées de manière régulière à plusieurs moments et nous donnent l'évolution du sol au cours du processus de dispersion. Les mesures du gonflement/affaissement et de l'élargissement de l'échantillon sont effectuées à 30 secondes, 1, 2, 4, 5, 10, 20, 40, 80 minutes, 4 heures et 6 heures. La durée totale de l'essai est identique à celle du « Crumb test » original.

Paramètres mesurés

Les mesures obtenues avec le nouvel appareillage (Figure 5-7) nous permettent de déterminer en fonction du temps les caractéristiques de l'échantillon suivantes:

- le gonflement,
- l'affaissement,
- l'élargissement.

Sur la Figure 5-7, l'axe des ordonnées représente la verticale (orientée vers les z croissants). La position en z représente la position du sommet de l'échantillon, l'origine étant sa position initiale au début de l'essai. Sur la courbe de gonflement et d'affaissement de l'échantillon, quatre phases sont observées consécutivement au cours de la dispersion : d'abord l'hydratation, puis un gonflement avec notamment la désaération de l'échantillon suivi par l'affaissement dû à la désagrégation et finalement la dispersion proprement dite.

La Figure 5-8 représente la courbe d'élargissement du diamètre D_t de l'échantillon au cours du temps. Pendant les phases d'hydratation, de désaération et de gonflement, le diamètre de l'échantillon s'élargit. Il augmente encore pendant la phase de désagrégation. Lorsque le sol est totalement dispersé, le diamètre atteint une valeur maximale D_m et il se stabilise.

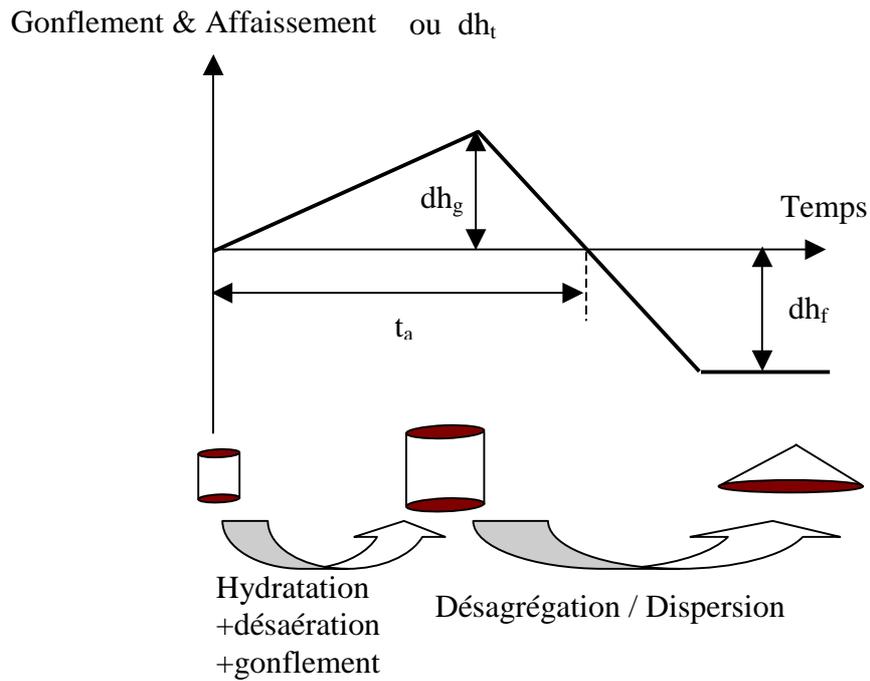


Figure 5-7 : Courbe de gonflement/affaissement de l'échantillon

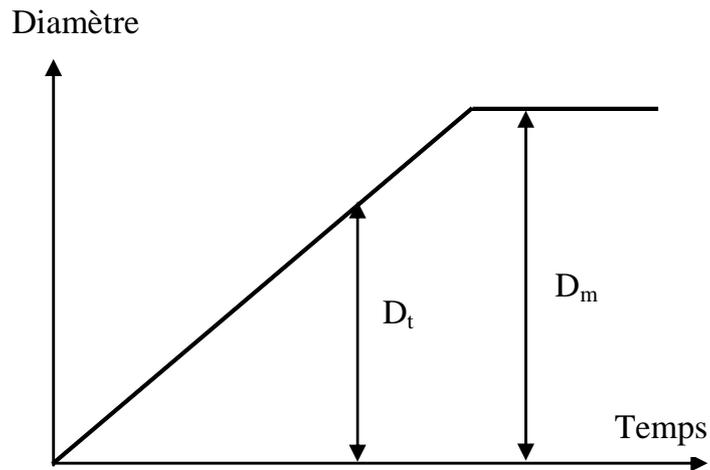


Figure 5-8. Courbe d'élargissement de l'échantillon

Les paramètres mesurés au cours du temps pour caractériser la dispersion sont :

- $dh(t)$: le gonflement/affaissement de l'échantillon à un instant t (mm),
- D_t : le diamètre de l'échantillon à l'instant t (mm).

Les autres valeurs déduites des courbes d'évolution au cours du temps des deux paramètres précédents (voir Figure 5-7) sont :

- dh_g : le gonflement maximal de l'échantillon (mm),
- dh_f : l'affaissement final de l'échantillon (mm),
- t_a : l'instant où se produit le déclenchement de la phase d'affaissement (min),
- H_0 : hauteur initiale de l'échantillon (mm),
- H_t : hauteur de l'échantillon à un instant t : $H_t = H_0 + dh(t)$ (mm),
- D_m : le diamètre maximal de l'échantillon après l'élargissement (mm).

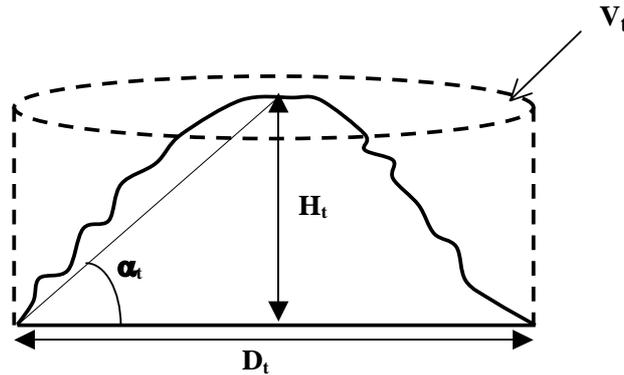


Figure 5-9. Forme de l'échantillon à un instant t . Caractéristiques : α_t : angle, H_t et D_t : hauteur et diamètre, V_t : volume de l'échantillon à l'instant t en cours d'essai.

A partir de ces paramètres, nous pouvons calculer les paramètres suivants :

- V_0 : le volume initial de l'échantillon (mm^3)
- V_t : le volume cylindrique englobant l'échantillon au moment t (mm^3)
- α_t : l'angle d'affaissement de l'échantillon au moment t (il est calculé comme arc tangence du rapport entre la hauteur et le rayon de l'échantillon)

α_t et V_t sont calculés selon les formules suivantes :

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{2 \times H_t}{D_t}\right) \qquad V_t = \frac{\pi \times D_t^2 \times H_t}{4}$$

Lorsque l'échantillon est affaissé, α_t représente l'angle typique du « tas » obtenu.

V_t est lié à la géométrie de l'échantillon et à son volume réel. Nous pouvons ainsi avoir une estimation $V_{\text{est}}(t)$ du volume réel de l'échantillon à partir de V_t . Tant que l'échantillon gonfle, il reste cylindrique et V_t représente une estimation du volume réel : $V_{\text{est}}(t) \approx V_t$. Une fois affaissée, l'échantillon est supposé avoir une forme de cône et nous avons alors une nouvelle estimation du volume réel : $V_{\text{est}}(t) \approx V_t/3$.

5.2.2 Résultats obtenus au moyen du nouvel essai d'émiettage

Après avoir développé un nouvel appareil basé sur le Crumb Test pour mesurer la dispersion des sols, nous avons testé le protocole sur les matériaux de référence (argile, limon et sable). Ces matériaux sont utilisés pour réaliser des textures qui ont également été testées. A partir de ces données, l'influence du type d'argile et son pourcentage dans le texture ont été mises en évidence. Pour compléter l'étude et montrer les possibilités du nouvel appareil d'essai, l'influence du fluide dispersant a été étudiée en utilisant successivement de l'eau salée et l'ajout de défloculant à l'eau distillée utilisée comme fluide dispersant jusque là.

5.2.2.1 Dispersion des matériaux de référence

La Figure 5-10-a représente les courbes de gonflement/affaissement de cinq matériaux de référence : argile de type kaolinite, argile de type illite, argile de type montmorillonite, limon et sable. La Figure 5-10-b montre la courbe d'élargissement du diamètre de l'échantillon de ces trois sols. Les deux figures montrent que:

- pour le sable (matériau granulaire non argileux), il n'y a pas de phase de gonflement et que l'affaissement est immédiat. L'élargissement du diamètre atteint la valeur maximale dès la première minute lorsque l'échantillon est en contact avec de l'eau,
- pour le limon (matériau fin peu argileux), après une phase d'hydratation où les contraintes maintenues par l'état de succion généré lors du compactage statique se relâchent, l'affaissement est rapide et la dispersion importante. L'élargissement du diamètre est progressif,
- pour l'argile de type kaolinite, on observe quatre phases se succéder : d'abord l'hydratation, puis un gonflement spécifique à l'argile, suivi par l'affaissement dû à la désagrégation et finalement la dispersion proprement dite. L'élargissement du diamètre est lent avant d'atteindre la valeur maximale,
- pour l'argile de type illite et montmorillonite, on n'observe qu'une phase de gonflement. L'élargissement du diamètre est peu important.

Les premières observations montrent que l'affaissement semble dépendre en grande partie de la cohésion des particules du sol et/ou de l'imperméabilité de l'échantillon. Une grande partie de la cohésion étant due à la présence d'argile, cette dernière joue vraisemblablement un rôle déterminant dans le ralentissement du processus d'affaissement tandis que le sable, qui est sans cohésion, a tendance à accélérer la désagrégation des grains du sol et donc l'affaissement.

En complément, l'évolution de l'angle d'affaissement et du rapport du volume à l'instant t sur le volume initial est donnée sur la Figure 5-10-c et -d. Considérant que seuls les échantillons de sable de limon et d'argile kaolinite sont effondrés (d'où un facteur $1/3$ pour évaluer $V_{est}(t)$ à partir de V_t), nous trouvons que le volume final estimé est de l'ordre de 2,5 fois le volume initial pour le limon et les argiles kaolinite et illite alors qu'il est d'environ 6 fois pour l'argile Montmorillonite. Nous vérifions ici le caractère réputé gonflant de cette dernière argile.

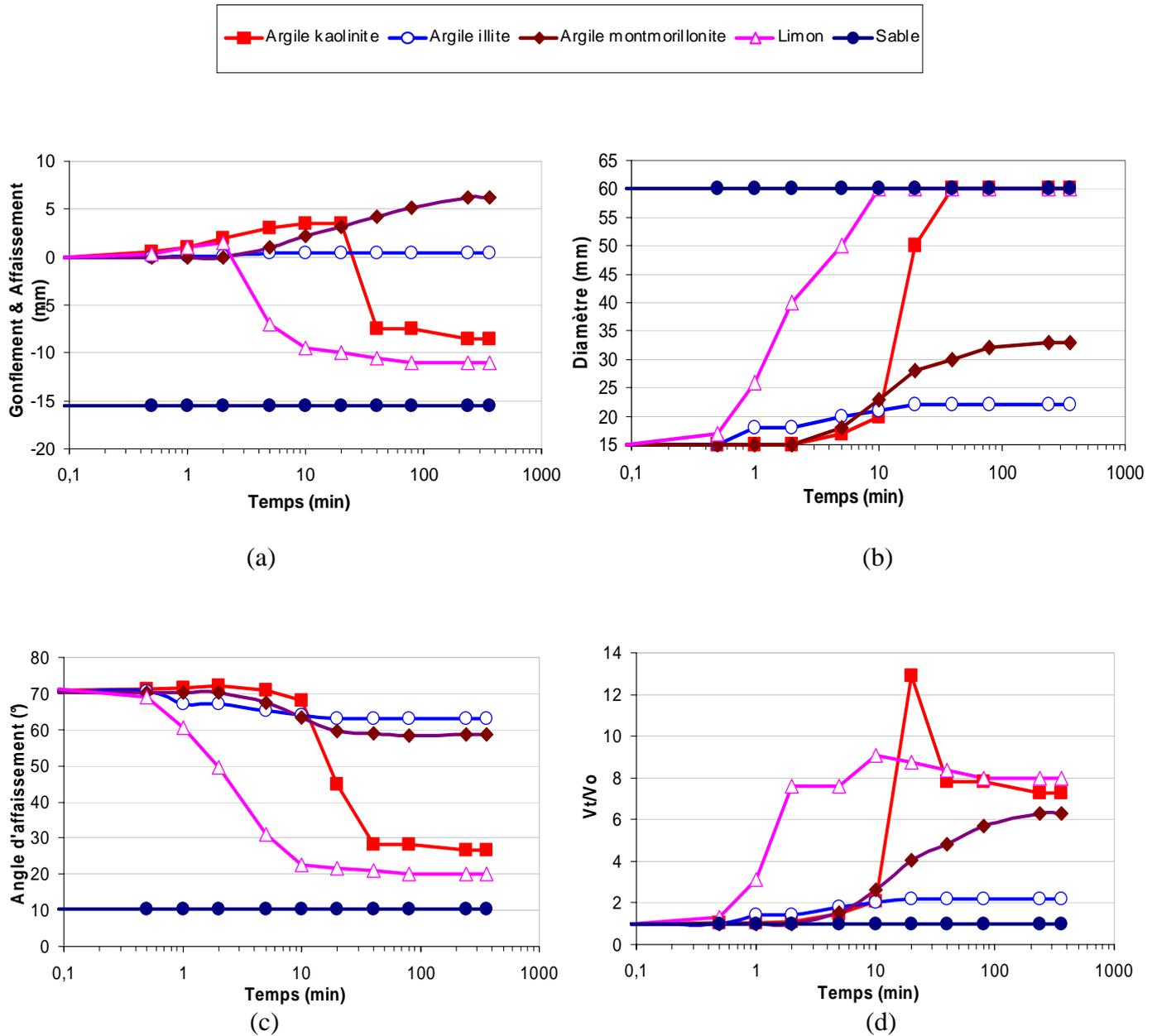


Figure 5-10. Pour les cinq matériaux de référence purs - sable, limon, kaolinite, illite et montmorillonite :
 (a) Courbe de gonflement/affaissement
 (b) Courbe d'élargissement, (c) Angle d'affaissement
 (d) Rapport du volume à l'instant t et volume initial

5.2.2.2 Dispersion des mélanges de matériaux de référence

Remarque : pour la lecture des courbes Figure 5-11 à Figure 5-13, le contraste des courbes indique la quantité d'argile présente dans le mélange. Plus la courbe est contrastée, plus le pourcentage d'argile dans la texture du sol est élevé.

Mélange de sable et d'argile de type kaolinite

À faible teneur en argile (<15%), l'échantillon s'affaisse dans les premières minutes de l'essai lorsqu'il est en contact avec de l'eau. L'échantillon ne présente pas de phase de gonflement, il désagrège puis se disperse dans l'eau (Figure 5-11-a). Comme la quantité d'argile qui joue le rôle d'un ciment est petite, la cohésion entre les grains n'est pas suffisante pour tenir la structure de l'échantillon lorsqu'il est en contact avec de l'eau. Le diamètre s'élargit jusqu'à une valeur maximale dans les premières minutes de l'essai (Figure 5-11-b). Le comportement du mélange est similaire à celui du sable.

Au-delà d'une teneur en argile de 20%, la cohésion entre les grains est suffisante pour maintenir la structure de l'échantillon. Du temps est nécessaire pour que l'eau puisse pénétrer dans la structure. Une fois entrée, l'eau pousse l'air hors de l'échantillon. L'échantillon gonfle par relaxation des contraintes initiales et adsorption d'eau sur les particules et dans les pores inter-agrégat jusqu'au moment où la liaison entre les grains est rompue. L'échantillon se désagrège progressivement puis se disperse dans l'eau (Figure 5-11-a). Le diamètre de l'échantillon augmente progressivement avec le temps avant d'atteindre une valeur maximale (Figure 5-11-b) semblable à celle observée dans le cas des textures sableuses ou limoneuses.

L'angle d'affaissement α (Figure 5-11-c) calculé à partir de l'observation de l'échantillon au cours de l'essai diminue avec le temps, c'est-à-dire que le sol se disperse au cours du temps. L'angle d'affaissement final (hormis les échantillons à très faible teneur en argile) semble dépendre faiblement du pourcentage d'argile de type kaolinite. En effet, la valeur limite de 20-30° est atteinte à la fin des essais.

Le rapport V_t/V_0 est également présenté sur la Figure 5-11-d. En fin d'essai, le V_t est 4 à 10 fois plus grand que le volume initial. Nous en déduisons donc un gonflement moyen aboutissant à un volume final variant de 1 à 3 fois le volume initial selon la fraction argileuse.

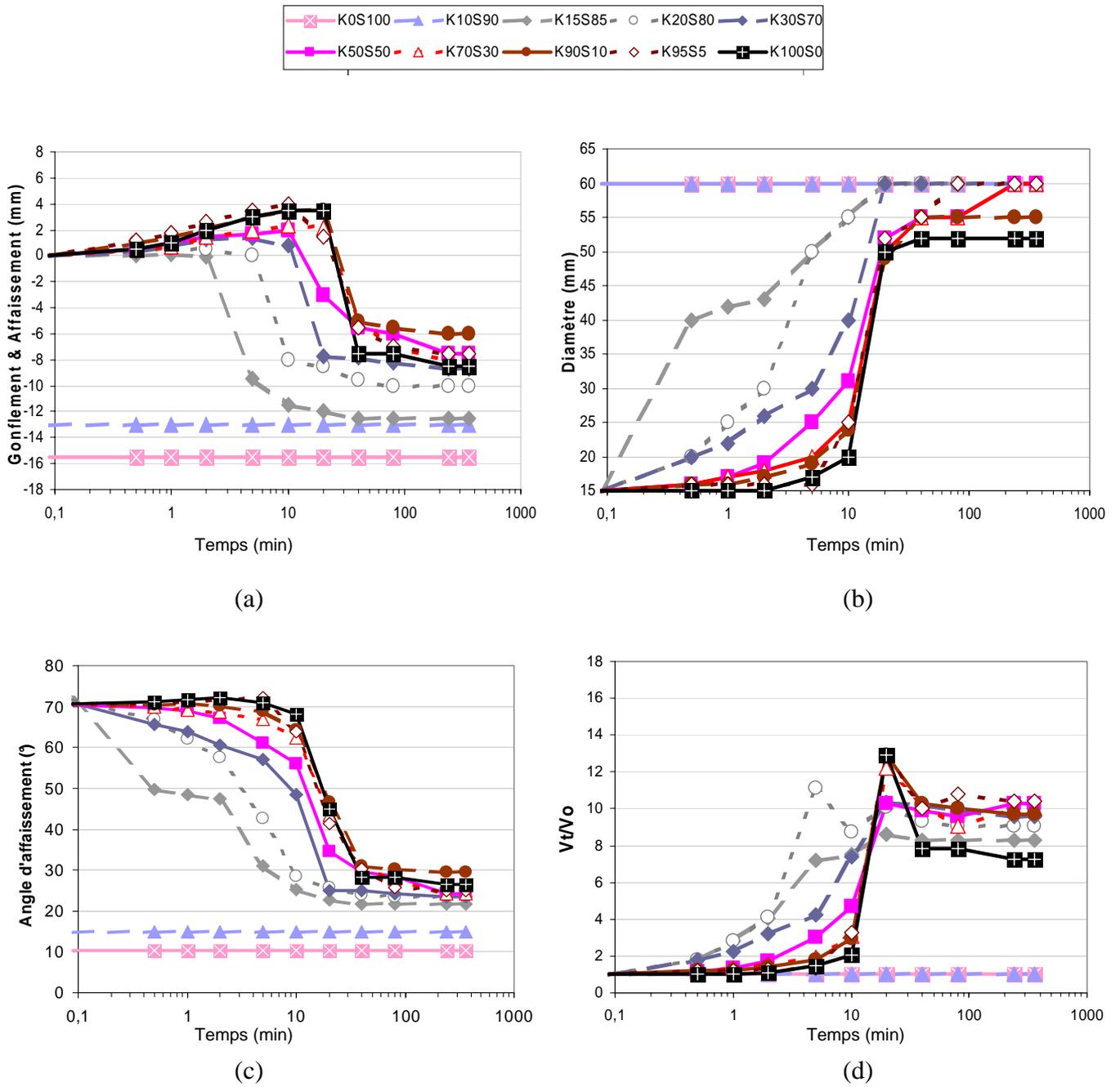


Figure 5-11. Mélange kaolinite(K)/sable(S). (a) Courbe de gonflement/affaissement
 (b) Courbe d'élargissement, (c) Angle d'affaissement
 (d) Rapport du volume à l'instant t et volume initial

Mélange de sable et d'argile de type illite

Une démarche similaire est adoptée pour étudier le mélange illite/sable. Ce type d'échantillon gonfle très peu cependant on note que la vitesse de gonflement reste invariante lorsqu'on change le pourcentage d'argile (Figure 5-12-a). L'élargissement du diamètre de l'échantillon semble suivre une cinétique semblable qui ne dépend pas du pourcentage d'argile dans le mélange (Figure 5-12-b).

L'angle d'affaissement diminue avec le temps et la vitesse de l'affaissement semble constante en fonction du pourcentage d'argile dans le mélange (sauf pour la texture à 100% d'argile). L'angle d'affaissement final est peu différencié d'un mélange à l'autre. Il semble atteindre une valeur finale située entre 20-30° (comme pour la kaolinite) quel que soit le pourcentage d'argile (Figure 5-12-c).

La Figure 5-12-d représente l'évolution du rapport V_t/V_0 . Nous pouvons alors estimer qu'en fin d'essai, pour les textures de 30 à 90% d'argile (échantillons affaissés), l'échantillon a un volume de l'ordre de 2,5 fois le volume initial et cela indépendamment du pourcentage d'argile. Ce chiffre est très proche de celui mesuré pour la texture à 100% d'argile qui n'a fait que gonfler et ne s'est pas affaissé. Nous mesurons donc là un paramètre pertinent puisque continu entre échantillons effondrés et non effondré.

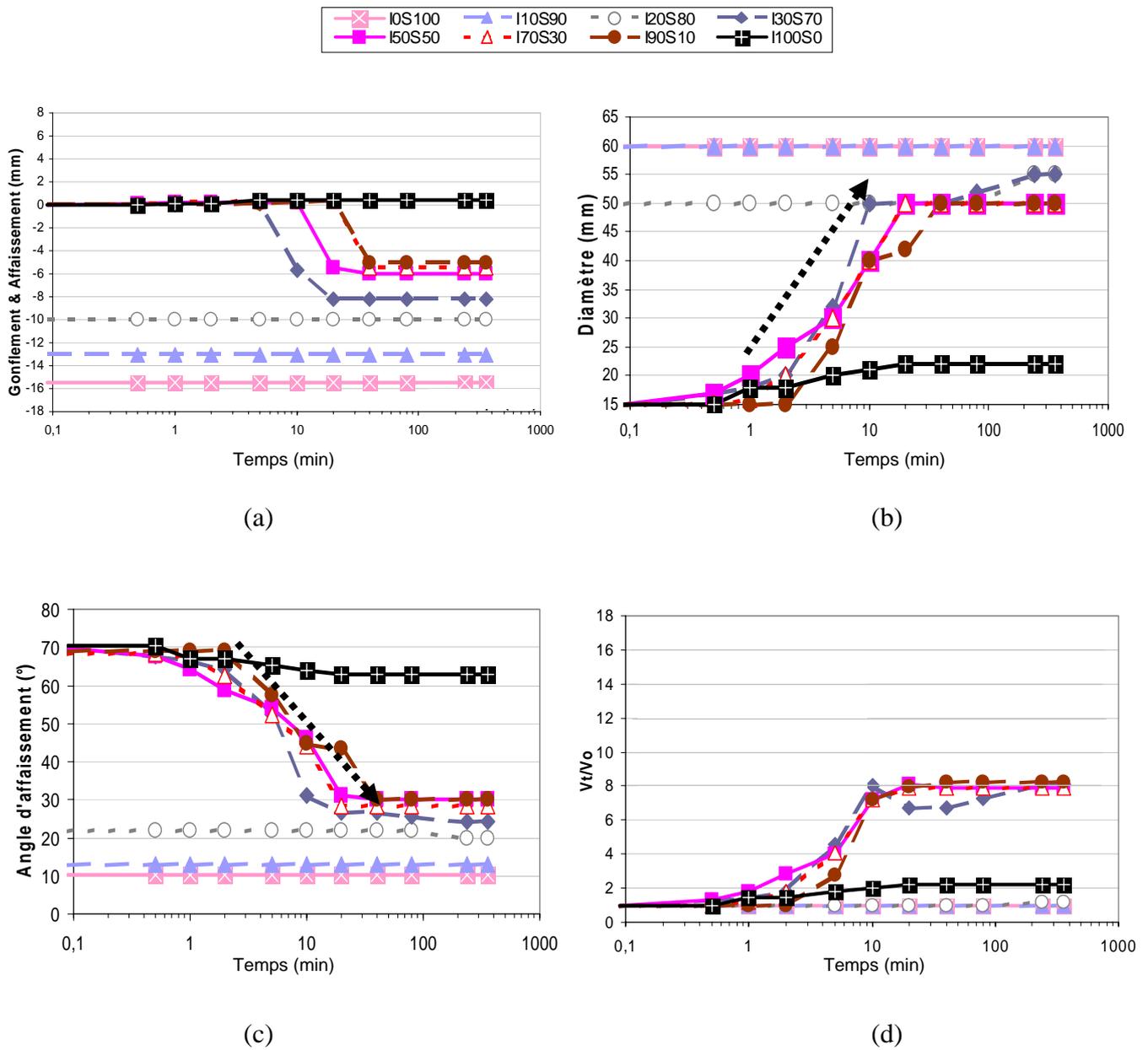


Figure 5-12. Mélange illite (I)/sable (S)
 (a) Courbe de gonflement/affaissement
 (b) Courbe d'élargissement, (c) Angle d'affaissement
 (d) Rapport du volume à l'instant t et volume initial

Mélange de sable et d'argile montmorillonite

L'échantillon du sable-montmorillonite gonfle plus par rapport au mélange de sable et de kaolinite ou d'illite mais avec une même vitesse lorsqu'on change le pourcentage d'argile (Figure 5-13-a).

L'élargissement du diamètre de l'échantillon de toutes les textures atteint la valeur maximale à la fin d'essai (Figure 5-13-b) sauf la texture 100% d'argile parce qu'elle gonfle toujours et ne s'affaisse pas à la fin d'essai (Figure 5-13-a).

L'angle d'affaissement diminue avec le temps et la vitesse de diminution semble distincte entre les textures. L'angle de frottement final est différent d'un mélange à l'autre, il semble dépendre du pourcentage d'argile (Figure 5-13-c).

La Figure 5-13-d représente le rapport entre le volume de l'échantillon au cours de l'essai et le volume initial. On voit qu'à la fin d'essai, le volume V_t est de 4 à 15 fois plus grand que le volume initial ce qui traduit un gonflement important conduisant à un volume final estimé V_{est} qui peut atteindre 5 ou 6 fois le volume initial V_0 .

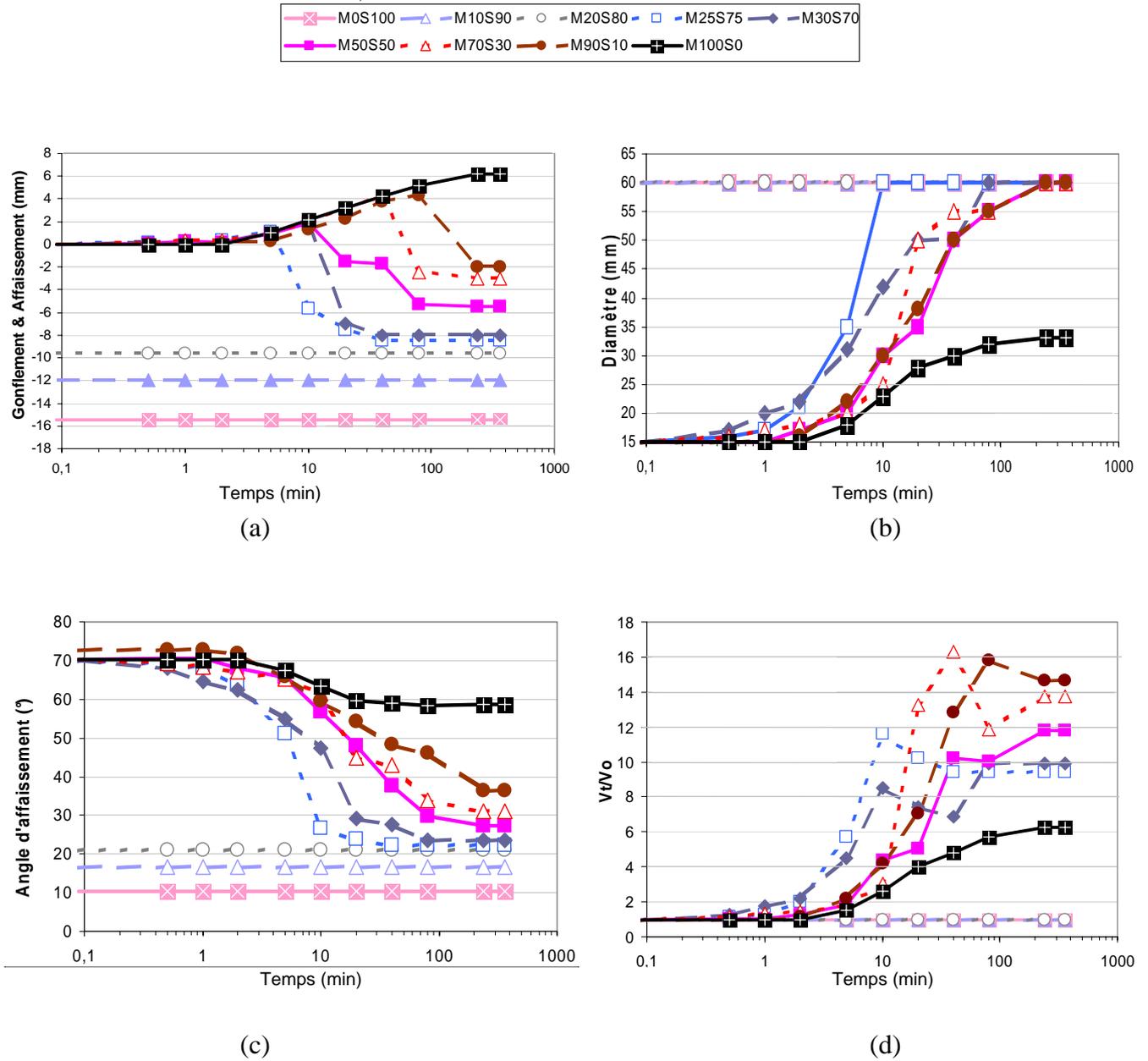


Figure 5-13. Mélange Montmorillonite (M)/sable (S)
 (a) Courbe de gonflement/affaissement
 (b) Courbe d'élargissement, (c) Angle d'affaissement
 (d) Rapport du volume à l'instant t et volume initial

Conclusion des essais de dispersion sur les mélanges sable/argile (K, I ou M)

Nous avons observé que **le gonflement** pour les mélanges avec la montmorillonite est le plus important en accord avec le fait que cette argile est réputée comme gonflante. Ce gonflement est également présent pour les mélanges avec la kaolinite contrairement à ceux comportant de l'illite. Le gonflement de la kaolinite se produit par adsorption d'eau sur les particules et dans les pores inter-agrégat plus que par pénétration d'eau dans les espaces interfeuillettes comme cela se produit dans la montmorillonite et beaucoup plus faiblement dans l'illite. Le gonflement est un paramètre qui favorise la dispersion due à ce phénomène.

L'affaissement des échantillons se produit toujours sauf dans le cas des textures 100% argileuses de type illite ou montmorillonite. Cet effondrement de la structure n'est pas observé sur les 6 heures de manipulation mais pourrait se produire après un temps beaucoup plus long. (L'échantillon de montmorillonite ne s'affaissant toujours pas après 2 jours de contact avec l'eau distillée). Les affaissements finaux dh_f les plus importants sont enregistrés pour les textures les plus sableuses ou limoneuses. La valeur du paramètre dh_f devient discriminante pour distinguer la sensibilité à la dispersion des mélanges sable/argile. Elle caractérise la dispersion par désagrégation des échantillons.

L'évolution du diamètre de l'échantillon au cours du temps est peu discriminante sauf pour les textures les plus sableuses ou les plus argileuses notamment en ce qui concerne les échantillons à base d'illite et de montmorillonite dont les diamètres sont les plus faibles en fin d'essais (les interactions entre particules assurent la cohésion de l'ensemble de la structure). Ce paramètre, intéressant, ne sera par conséquent pas retenu pour classer les textures selon leur tendance à disperser de même que l'angle d'affaissement. L'angle d'affaissement se comporte en effet de manière assez similaire en ne permettant de discerner que des textures à très forte ou très faible teneur en sable ou argile. Le changement de comportement se produit pour les faibles teneurs en argile autour de 10-15% de kaolinite, 20-30% d'illite et 20-25 % de montmorillonite dans le mélange ; pour les fortes teneurs d'argiles, le changement ne se produit pas vraiment pour la kaolinite. Il est progressif pour la montmorillonite et se produit entre 90-100% d'illite dans le mélange.

En considérant l'évolution du **volume de l'échantillon par rapport à son volume initial** pour les différents mélanges, nous remarquons que pour une fraction de fines >10% en présence de kaolinite et d'illite, le volume final V_{est} approche une valeur maximale qui ne dépend pas du pourcentage d'argile dans le mélange. Dans le cas des mélanges avec la montmorillonite, le volume final est différent d'une texture à l'autre et augmente avec le pourcentage d'argile. Le volume final des échantillons composés de sable et de kaolinite ou d'illite est 2 ou 3 fois plus élevé que son volume initial tandis qu'il est de l'ordre de 3 à 5 fois plus pour les échantillons comportant de la montmorillonite. Ce rapport peut être utilisé comme paramètre discriminant les textures de forte ou faible dispersivité.

En conclusion, parmi les trois types de mélange sable/argile, les mélanges réalisés avec la montmorillonite sont les plus dispersifs si on se reporte aux textures caractérisées par les paramètres V_{est}/V_0 les plus grands, puis viennent les mélanges avec la kaolinite et enfin les mélanges avec l'illite.

Mélange de sable, de limon et d'argile

Nous avons montré dans le paragraphe précédent que le nouvel essai d'émiettage permet de distinguer la dispersion d'un mélange sable/argile suivant le type d'argile. Nous allons présenter dans ce paragraphe les résultats des essais menés sur les mélanges de sable, d'argile (kaolinite) et de limon qui correspondent aux textures étudiées au moyen des autres essais de dispersion ou d'érosion et présentées au Chapitre 2.

Les Figure 5-14-a et Figure 5-14-b représentent les courbes de gonflement/affaissement et d'élargissement obtenues pour l'ensemble des textures. Contrairement à l'essai de « Crumb test » selon la norme ASTM qui ne permet pas de déterminer une classe de dispersion particulière pour chaque texture, des comportements très variés sont obtenus avec le crumb test amélioré. Si ces deux figures sont comparées avec les résultats obtenus dans le Tableau 5-4, nous constatons que l'essai d'émiettage nous permet de détecter le changement de comportement de l'échantillon de sol entre $t=2$ min et $t=1$ h (il gonfle puis s'affaisse et enfin se disperse) tandis que le « Crumb Test » normalisé n'en est pas capable.

Lorsque la texture est composée majoritairement de sable (>50%) avec moins de 30% d'argile, le comportement de l'éprouvette ne présente pas de phase de gonflement. Cette dernière s'affaisse rapidement. Inversement, plus la texture est argileuse, plus l'éprouvette gonfle et moins elle s'affaisse (la phase de dispersion caractérisée par un affaissement lent étant relativement importante). La valeur du gonflement maximale dh_g , et celle de l'affaissement final dh_f ainsi que l'instant t_a où se déclenche la phase d'affaissement semblent directement liés au pourcentage d'argile (Figure 5-14-a).

La Figure 5-14-c présente l'angle d'affaissement de différentes textures de sol au cours du temps. La valeur finale de l'angle semble constante quelle que soit la texture de même que le rapport du volume final comparé au volume initial (Figure 5-14-d). Ce rapport est de l'ordre de 6-10, quelle que soit la texture. Ce rapport est en accord avec le rapport trouvé pour les mélanges binaires sable/kaolinite.

Conclusion des essais de dispersion sur les textures sable, argile et limon

Le nouvel essai d'émiettage a prouvé par les résultats obtenus qu'il était capable de discerner de manière quantitative le comportement dispersif de plusieurs textures.

Il est intéressant de remarquer également que la courbure de la courbe granulométrique (Figure 2.3) en relation avec le pourcentage de limon dans la texture influence fortement les résultats. À proportion de sable constante, diminuer la proportion d'argile au profit du limon (texture 3 vers 5, texture 2 vers 6) fait disparaître la phase de gonflement et entraîne un affaissement rapide. À proportion d'argile constante et si l'argile est majoritaire, substituer du sable par du limon (texture 4 vers 8, texture 1 vers 5) diminue également la phase de gonflement ainsi que le laps de temps avant le déclenchement de la phase d'affaissement.

Outre la granulométrie, la nature de l'argile et son pourcentage dans le mélange semblent demeurer les paramètres déterminants du comportement de la texture. L'influence de ces deux caractéristiques est discutée en détail dans le paragraphe qui suit.

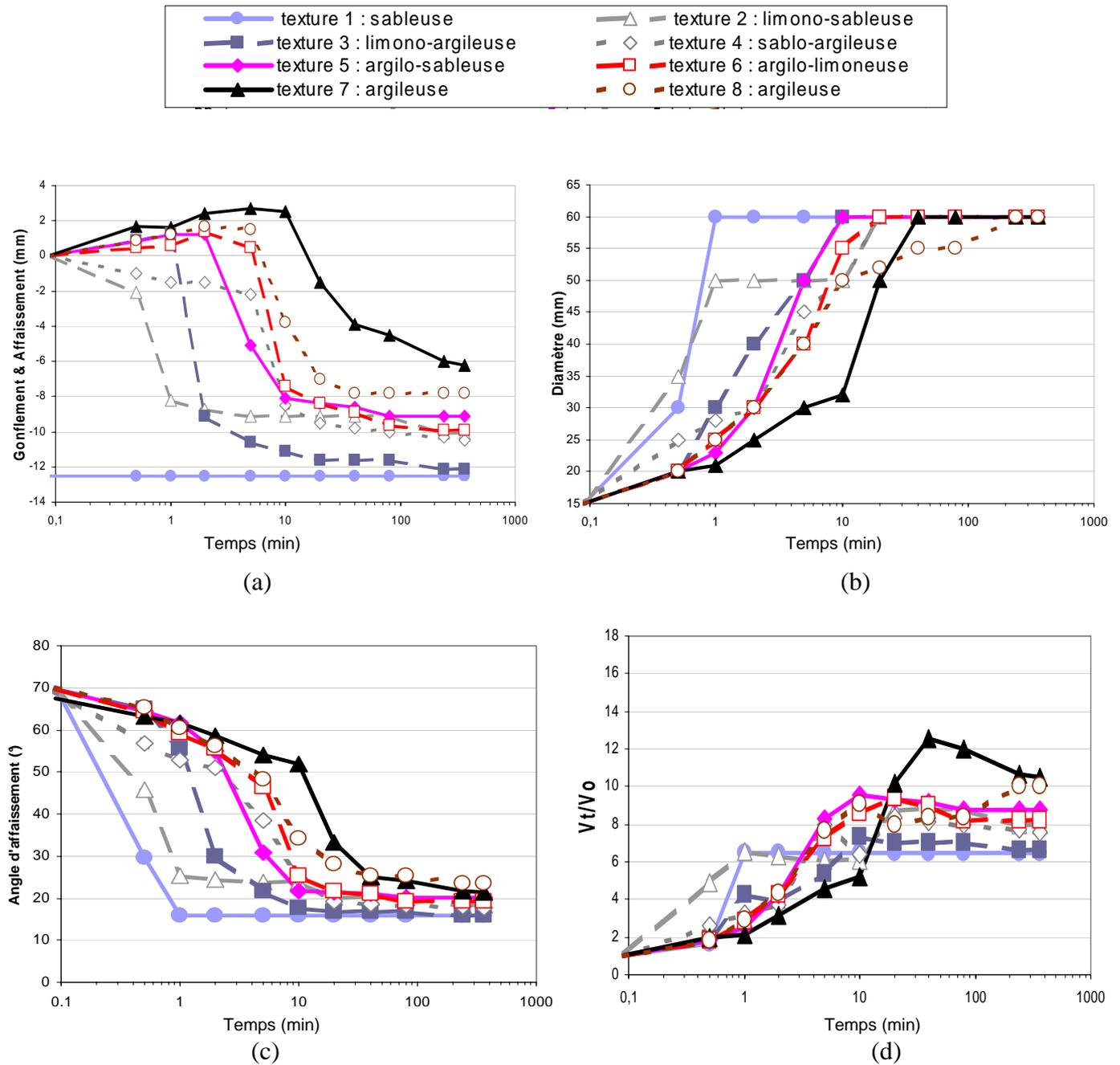


Figure 5-14. Mélange de sable, limon et kaolinite correspondant aux textures du tableau 2.4.

- (a) Courbe de gonflement/affaissement
- (b) Courbe d'élargissement, (c) Angle d'affaissement
- (d) Rapport du volume à l'instant t et volume initial

5.2.3 Influence du pourcentage et du type d'argile sur la dispersion mesurée avec le nouvel essai d'émiettage

A partir du croisement des données, obtenues au cours des nouveaux essais, détaillées dans le paragraphe précédent, l'influence de la quantité d'argile dans les mélanges sable /argile et sable/argile/limon est discutée de même que l'influence de la nature de l'argile.

La dispersion des sols étant liée à la présence des particules fines, nous proposons de relier le pourcentage d'argile dans un sol avec ses propriétés de dispersion caractérisées par les paramètres tels que le gonflement maximal, l'affaissement final et le temps de déclenchement de la phase d'affaissement de l'échantillon.

L'échantillon gonfle avec le temps pour les mélanges à base de kaolinite, d'illite ou de montmorillonite. Le gonflement maximal de l'échantillon augmente linéairement avec le pourcentage d'argile dans le sol (Figure 5-15) quel que soit le type d'argile. Cette linéarité est cependant moins nette en ce qui concerne les mélanges incorporant le limon. Les échantillons réalisés avec la montmorillonite gonflent le plus. Viennent ensuite les mélanges à base de kaolinite et enfin ceux à base d'illite. Ce classement semble particulièrement intéressant sachant que selon la minéralogie des argiles, l'illite est supposée plus gonflante que la kaolinite ce que nous n'observons pas dans notre cas. Nous avançons une hypothèse d'après les observations au MEBE montrant l'illite collée au grain de sable de manière plus intime. La désagrégation des amas sable/kaolinite (plus perméable) serait responsable du gonflement observé alors que les mélanges avec de l'illite ou de la montmorillonite présentent un gonflement relié à celui des agrégats par pénétration de l'eau entre les feuillets.

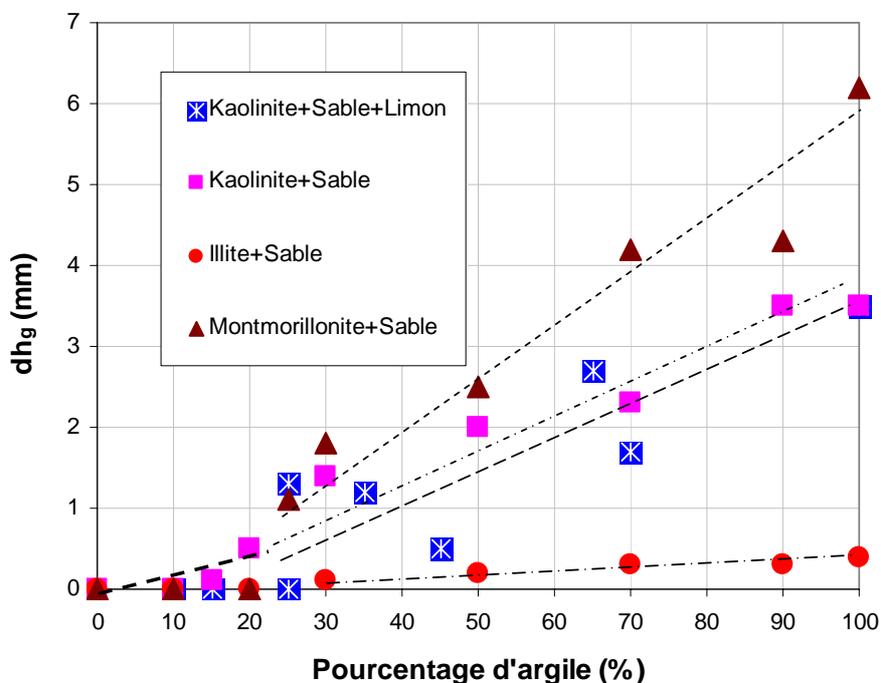


Figure 5-15 : Gonflement maximal pour les mélanges contenant l'un des trois types d'argile étudiés.

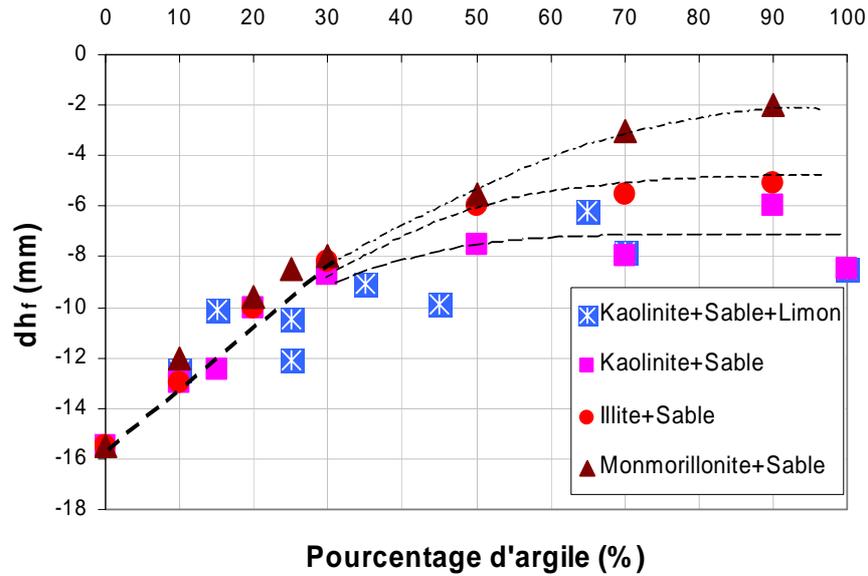


Figure 5-16 : Affaissement maximal pour les mélanges contenant l'un des trois types d'argile étudiés.

L'affaissement final quant à lui semble diminuer avec le pourcentage d'argile. Avec un pourcentage d'argile inférieur à 30%, l'affaissement des mélanges quelle que soit l'argile semble similaire (Figure 5-16).

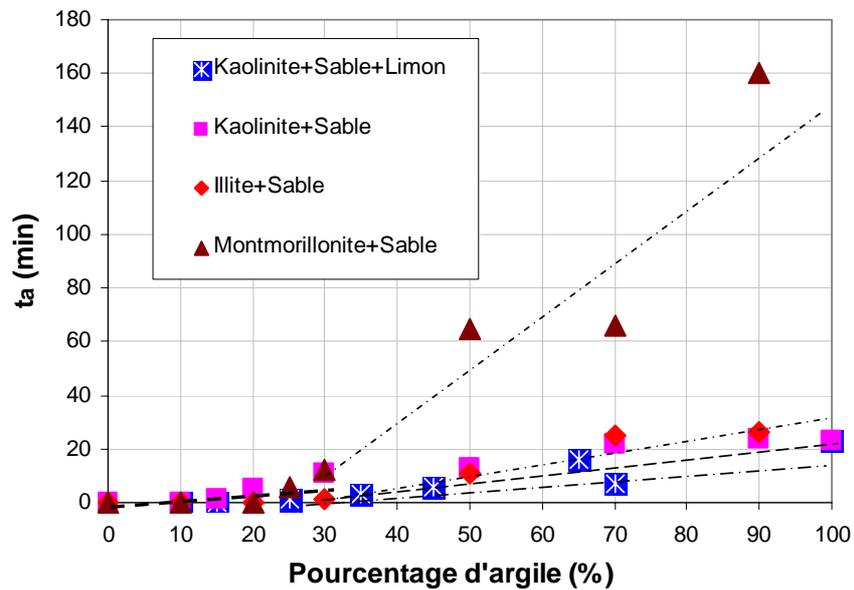


Figure 5-17 : Intervalle de temps avant le début de l'affaissement pour les mélanges contenant l'un des trois types d'argile étudiés.

Enfin, le laps de temps nécessaire pour atteindre la phase d'affaissement augmente avec le pourcentage d'argile pour des textures comportant plus de 30% d'argile. Ce phénomène s'explique par le fait que la cohésion augmente avec le pourcentage de fines présentes. La structure de l'échantillon est maintenue par la cohésion entre les grains. L'intervalle de temps avant le début de l'affaissement est presque le même pour les mélanges avec la kaolinite ou

l'illite ; pour les mélanges avec la montmorillonite, cet intervalle de temps est plus élevé (Figure 5-17).

En résumé, pour le mélange sable/kaolinite ou les mélanges sable/limon /kaolinite, le gonflement semble différent selon le pourcentage d'argile mais l'angle d'affaissement final ne dépend pas (ou peu) du pourcentage d'argile. Pour le mélange de sable et d'illite, le gonflement semble identique selon le pourcentage d'argile et l'angle d'affaissement final dépend peu du pourcentage d'argile. Pour le mélange de sable et de montmorillonite, le gonflement semble identique selon le pourcentage d'argile mais l'angle d'affaissement final dépend du pourcentage d'argile.

5.2.4 Influence du fluide sur la dispersion mesurée avec le nouvel essai d'émiettage

Si la granulométrie ou la nature minéralogique des constituants du sol ont un impact sur les propriétés de dispersion de ce sol, il ne faut pas oublier que le fluide au contact des particules joue également un rôle. Nous avons souhaité montrer ce rôle en comparant le comportement des trois types d'argiles (matériaux de référence) choisis dans cette étude: la kaolinite (réputée non gonflante), la montmorillonite (réputée gonflante) et l'illite (réputée non ou peu gonflante).

Les nouveaux essais d'émiettage ont été réalisés avec trois types de fluide :

- eau distillée (avec présence de 0,4 mg/L de Ca, 0,6 mg/L de Na, 0,9 mg/L de Si, détection de Mg, S et Cl)
- eau du réseau d'eau potable (avec présence de 90 mg/L de Ca, 5,3 mg/L de Na, 1,8 mg/L de Si, de 3,3 mg/L de Mg, de 1,8mg/L de K, détection de Fe, S et Cl),
- eau salée (la concentration en NaCl est de 0,6 mol.l⁻¹ soit 13 g/L, équivalente à la concentration du sel dans l'eau de mer).

Le choix de ces fluides est justifié par le fait que l'eau distillée est le fluide préconisé dans l'essai de crumb test normalisé et utilisé jusqu'à présent dans le nouvel essai d'émiettage compte tenu de la faible quantité de solution nécessaire. L'eau du réseau potable est par contre utilisée dans les essais d'érosion de type Erosion de trou ou EJM compte tenu des grandes quantités nécessaires pour chaque essai. Pour comparaison, l'eau du réseau potable a donc été utilisée comme fluide dispersant dans l'essai de crumb test amélioré. De plus, l'eau du robinet compte tenu de sa teneur en cation plus élevée par rapport à l'eau distillée est plus à même de simuler un fluide naturel (eau de rivière...). Enfin, l'eau salée est également testée en tant que fluide dispersant car certains ouvrages en terre peuvent être amenés à être en contact avec de l'eau de mer ou du moins des eaux fortement chargées en sel.

Les résultats des essais de nouvel essai d'émiettage obtenus avec les trois fluides dispersants choisis sont présentés sur les Figure 5-18 et Figure 5-19. Ces figures montrent les variations des courbes de gonflement et affaissement et du diamètre de l'échantillon selon le type d'argile dans le mélange.

Le comportement de la montmorillonite et de l'illite est différent de celui de la kaolinite. L'échantillon de kaolinite est celui qui présente le gonflement le plus rapide. Il est également le seul à s'effondrer en présence d'eau distillée comme cela a été décrit sur la Figure 5-11.

L'échantillon de montmorillonite gonfle relativement lentement sur toute la durée de l'essai tandis que l'échantillon d'illite gonfle peu et reste assez inerte. La présence d'autres milieux dispersants ne semble pas changer globalement la tendance des courbes observée avec l'eau distillée.

L'élargissement de l'échantillon sur le fond du récipient (Figure 5-19) mesuré grâce à la cible dessinée au fond du récipient, est le plus grand pour l'échantillon de kaolinite quel que soit le fluide. Vient ensuite l'élargissement observé pour la montmorillonite et enfin pour l'illite.

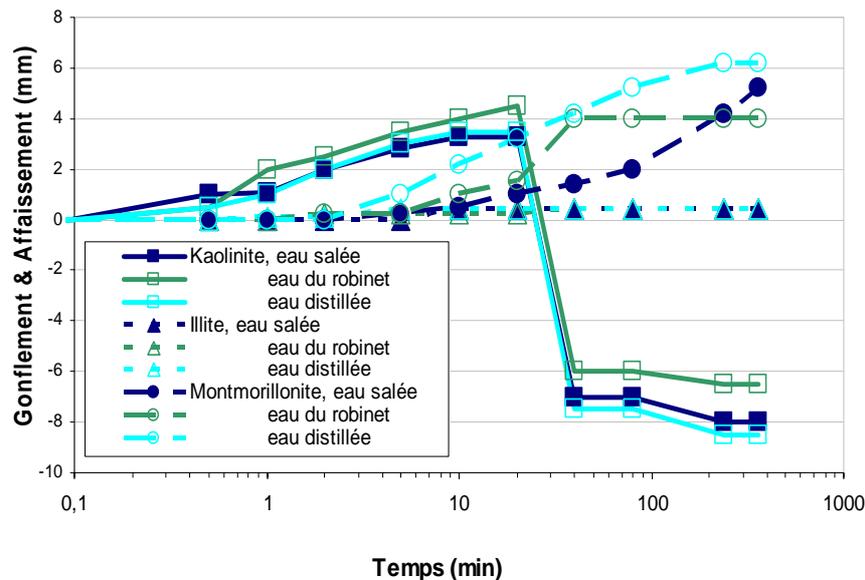


Figure 5-18 : Gonflement et affaissement observés pour chacune des argiles de référence

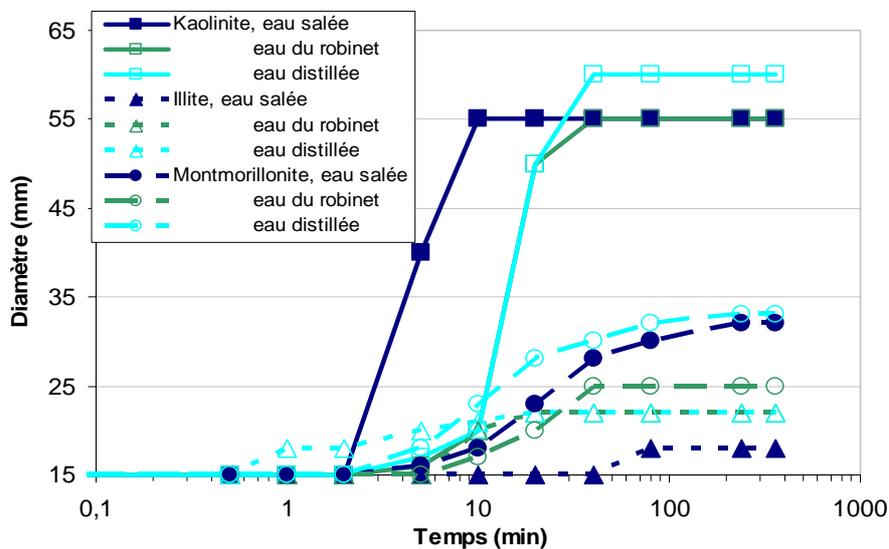


Figure 5-19 : Élargissement observé pour chacune des argiles de référence

Si les courbes sont observées plus en détail, l'augmentation des cations en solution (Ca ou Na) lors des essais d'émiettage entraîne une diminution sensible de l'élargissement de l'échantillon (Figure 5-19) ainsi que dans le cas de la montmorillonite un ralentissement voire une diminution du gonflement (Figure 5-18). Aucune évolution nette de l'affaissement

de l'échantillon n'est visible. Ces observations sont d'autant plus vraies que la solution est chargée en cations (notamment dans l'eau salée).

Pour expliquer ces observations, il est nécessaire de faire appel aux notions d'interaction entre particules en solution exposées dans le chapitre 1. La présence des ions sodium ou calcium (même si ce dernier à un effet moindre) est responsable de la diminution de l'épaisseur de la 'double couche' entourant les particules d'argile ce qui a pour conséquence de diminuer la force de répulsion entre les particules. Les particules ont tendance à flocculer ou s'agréger. La dispersion des argiles se trouve par conséquent limitée dans un environnement salé. La formation d'agrégats qui maintiennent la cohésion de l'échantillon est sans doute à l'origine de la diminution de l'élargissement. De même l'augmentation de la quantité de cations libres dans le milieu diminue le gonflement en favorisant le rapprochement des feuillets.

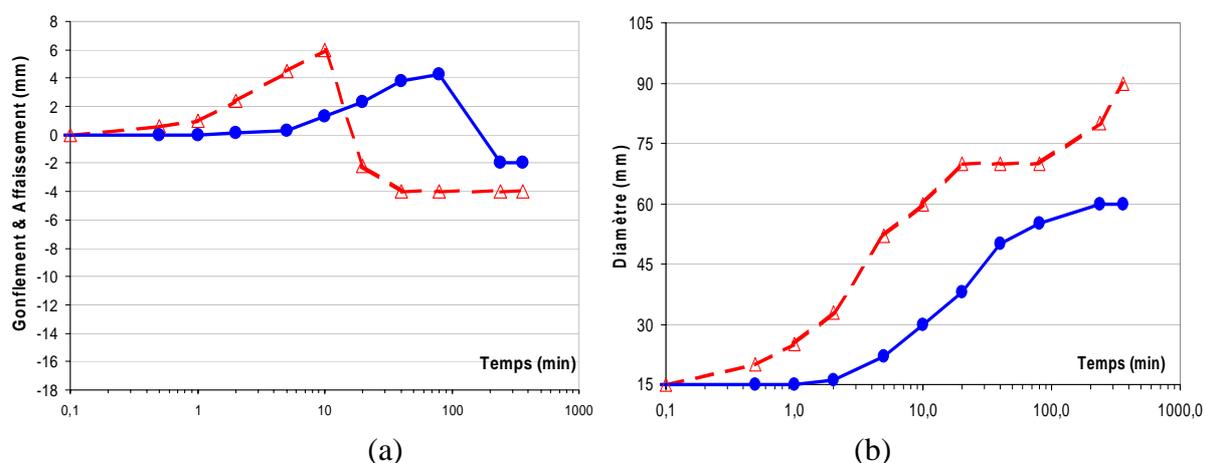


Figure 5-20: Courbe de gonflement/affaissement (a) et d'élargissement (b) d'un échantillon de la texture sable/ montmorillonite (90%/10%) dans l'eau distillée (●) et dans une solution d'hexamétaphosphate de sodium servant de défloculant (Δ).

Pour terminer, un nouvel essai d'emiettage a été réalisé en utilisant une solution d'hexamétaphosphate de sodium (6%) servant de défloculant sur la texture sable montmorillonite avec 90% de montmorillonite (donc une texture avec une forte cohésion entre particules). A l'inverse du sel, l'hexamétaphosphate de sodium (utilisé comme défloculant dans l'essai de sédimentométrie ou de double hydrometer test) favorise la dispersion des argiles. L'intervalle de temps pour atteindre la phase d'affaissement est plus courte et l'amplitude de l'élargissement est accrue par rapport à celle mesurée dans l'eau distillée (Figure 5-20). Dans cet environnement, le sol est plus dispersif que dans l'eau distillée.

D'autres essais devront être menés ultérieurement pour montrer si l'utilisation d'hexamétaphosphate de sodium lors des essais de crumb test peut présenter un avantage en termes de temps de manip (essai plus rapide) et de précision (essais permettant de discerner plus facilement et nettement les différences de sensibilité à la dispersion des textures) .

5.3 APPORT DE LA ZETAMETRIE

Les nouveaux essais d'émiettage en présence de différents fluides dispersifs ont mis en évidence le rôle non négligeable de ce fluide. Des mesures en zétamétrie sont venues par conséquent compléter de manière naturelle l'étude du phénomène de dispersion. Ces mesures à l'échelle microscopique donnent en effet des indications sur les interactions électrostatiques entre particules chargées en suspension.

Le protocole imposant que les particules soient de taille inférieure à 50 μm , les mesures en zétamétrie permettent de déterminer les conditions pour lesquelles les particules argileuses ont tendance à la dispersion en suspension (particule facilement emporté par le fluide érodant) ou bien à l'agglomération (particules qui s'agrègent et sédimentent et sont donc plus facilement retenues par l'ouvrage).

Ces mesures, qui expliquent les résultats du nouvel essai d'émiettage utilisant des fluides dispersant de natures différentes, sont également à relier aux mesures obtenues avec le double hydrometer test. Les mesures de zétamétrie apportent des informations précieuses lorsque les caractéristiques du fluide érodant varient que ce soit en terme de composition (nature des cations en solution) ou de concentration (rôle de la force ionique). Ces différents aspects ont été abordés au travers de la bibliographie dans le chapitre 1.

5.3.1 Principe

Une particule solide en présence d'eau (eau liquide ou eau adsorbée à sa surface au contact de l'atmosphère) se charge de manière naturelle avec l'apparition de groupements OH protonnable ou déprotonnable. Certains matériaux comme les argiles présentent en plus une charge permanente compte tenu de leur structure minéralogique (substitution d'éléments dans le réseau créant un déficit de charge). Lorsque par un processus quelconque, la particule solide chargée est mise en mouvement dans la suspension qui la contient, une couche de liquide structuré (eau et cations) au contact direct de la surface accompagne la particule dans son mouvement. Le potentiel porté par le plan qui sépare la couche de liquide mobile par rapport au reste de la phase liquide qui reste immobile au cours du mouvement (ou plan de cisaillement hydrodynamique) est appelé potentiel zêta (Riddick, 1968). Le potentiel zêta n'est pas une caractéristique intrinsèque d'une particule mais de la suspension formée par les particules dispersées dans la solution.

Tableau 5-8: Echelle de stabilité des particules selon potentiel zêta (d'après Riddick, 1968)

Caractéristique de stabilité	Potentiel zêta (mV)	
	Maximum d'agglomération	0 à -3
Forte agglomération	-3 à -5	3 à 5
Seuil d'agglomération	-10 à -15	10 à 15
Seuil de faible dispersion	-16 à -30	16 à 30
Stabilité médiocre	-30 à -40	30 à 40
Bonne stabilité	-40 à -60	40 à 60
Très bonne stabilité	-60 à -80	60 à 80
Stabilité excellente	-80 à -100	80 à 100

Le potentiel zêta peut être écrit :

$$\zeta = \varphi_0 \exp(-kd)$$

où :

- d est la distance du plan de cisaillement hydrodynamique à la surface de la particule.
- φ_0 le potentiel à la surface de la particule créé par la charge de surface
- k relié au milieu liquide représente l'inverse de l'épaisseur de la double couche : $k = \chi^{-1}$ (χ varie en fonction de la nature et de la concentration du milieu électrolytique).

Le potentiel zêta est donc relié à la charge électrique superficielle de la particule. Il caractérise l'intensité des forces répulsives interparticulaires (Figure 5-21). Ce potentiel est l'un des paramètres fondamentaux intervenant au cours de la floculation de particules en suspension. Aussi, en comparant les mesures de potentiel zêta avec l'échelle de stabilité établie par exemple par Riddick (1968) (Tableau 5-8), la sensibilité à la dispersion des particules fines constitutives d'un sol peut être approchée de façon simple.

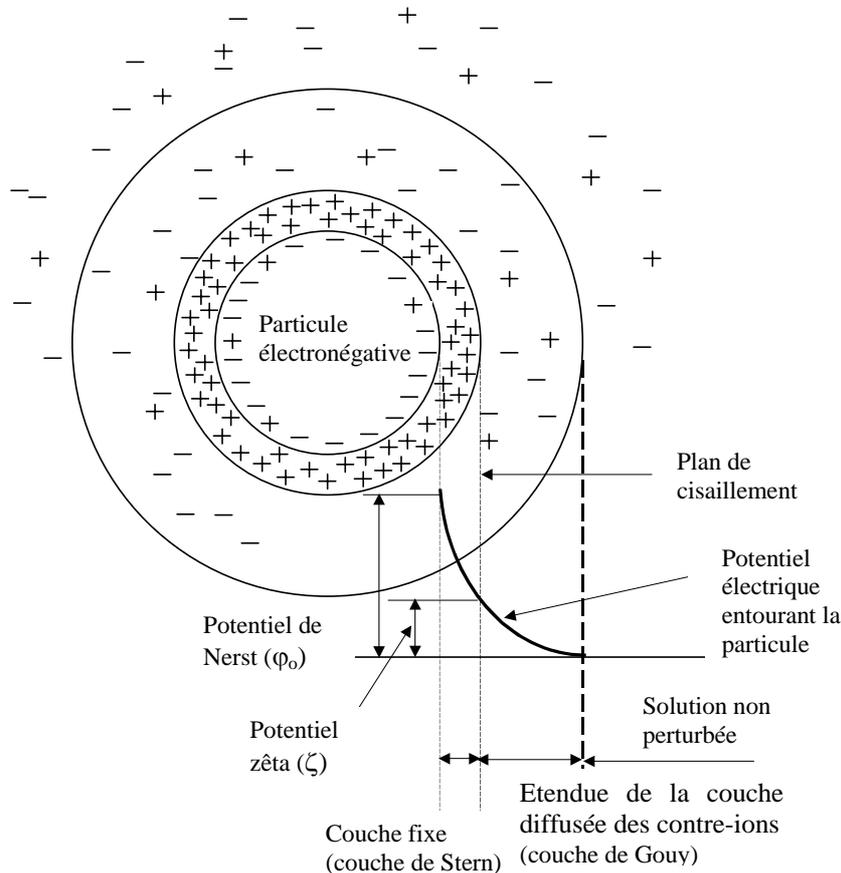


Figure 5-21 : Définition du potentiel zêta

Pour aller plus loin, l'interaction entre particules est généralement représentée par la combinaison de forces d'attraction et de forces de répulsion. Les forces d'attraction (force d'attraction Van der Waals) dépendent de la forme et de la taille des particules, de la constante diélectrique et de la température. Elles sont pratiquement indépendantes de la concentration en sel dans le milieu contrairement aux forces de répulsion (force de répulsion de double couche de nature électrostatique mesurée par le potentiel zêta) qui dépendent de la

présence ou l'absence de sel dans le système (concentration d'électrolyte, valence du cation), de la constante diélectrique, et du pH. L'énergie d'interaction entre particules de même nature en fonction de la distance inter-particule résultant de la combinaison des forces attractives et répulsives est représentée par la Figure 5-22 (théorie DLVO – Israelachvili, 1985).

La courbe d'interaction montre une barrière d'énergie répulsive élevée, les particules en suspension sont empêchées de s'approcher les unes des autres, et la suspension dispersée est stable. Dans les cas où la barrière répulsive est de faible énergie, les particules peuvent venir à proximité les unes des autres et la floculation apparaît lentement au cours du temps, ce qui se traduit par un minimum sur la courbe d'énergie (suspension instable qui flocule). Lors que la barrière d'énergie répulsive (variant avec la concentration en sel dans la suspension par exemple) n'existe pas, les particules forment rapidement des agrégats (suspension agrégée stable)

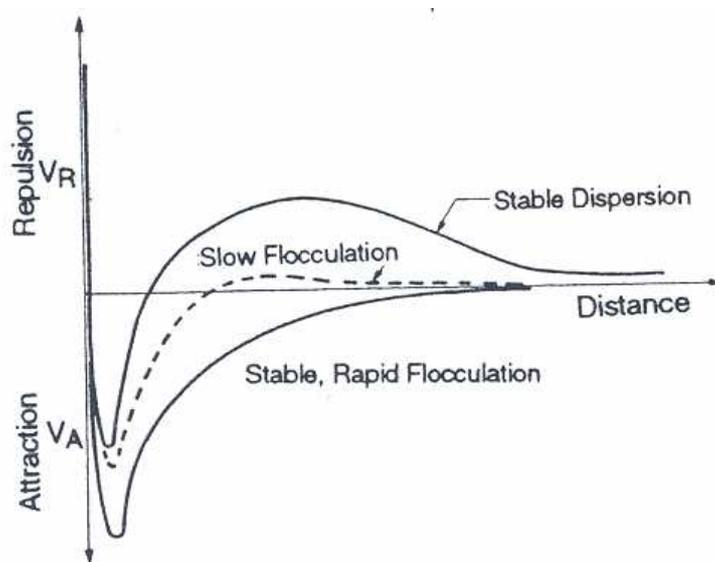


Figure 5-22 Energie d'interaction entre deux particules chargées (Verwey et Overbeek, 1948).

5.3.2 Appareillage

Le zétamètre au LCPC est le Zetaphoremeter IV de chez CAD qui mesure des mobilités électrophorétiques et calcule le potentiel zêta des suspensions colloïdales (Figure 5-23). L'équipement est composé d'une source laser, d'un capillaire en quartz placé entre deux électrodes recouvertes de palladium, d'un microscope couplé à une caméra d'enregistrement du mouvement des particules sous l'effet du champ électrique généré entre les deux électrodes et enfin d'un logiciel de traitement des trajectoires des particules afin de calculer la mobilité de la particule puis le potentiel zêta.

5.3.3 Protocole de mesure

Comme la position du plan de cisaillement hydrodynamique ne peut pas être déterminée expérimentalement, la valeur du potentiel zêta n'est pas accessible directement. Afin de calculer ce potentiel électrique, on utilise en général la relation d'Helmholtz-Smoluchowski

qui permet à partir d'une mesure de la vitesse de déplacement des particules en suspension sous l'influence d'un champ électrique d'en calculer la valeur :

$$\Psi_{\zeta} = 4\pi\eta \mu / \varepsilon$$

avec

- Ψ_{ζ} : potentiel zêta en mV
- η : viscosité du milieu connue
- ε : constante diélectrique connue
- μ : vitesse de migration des particules mesurée
- E : champ électrique imposé.

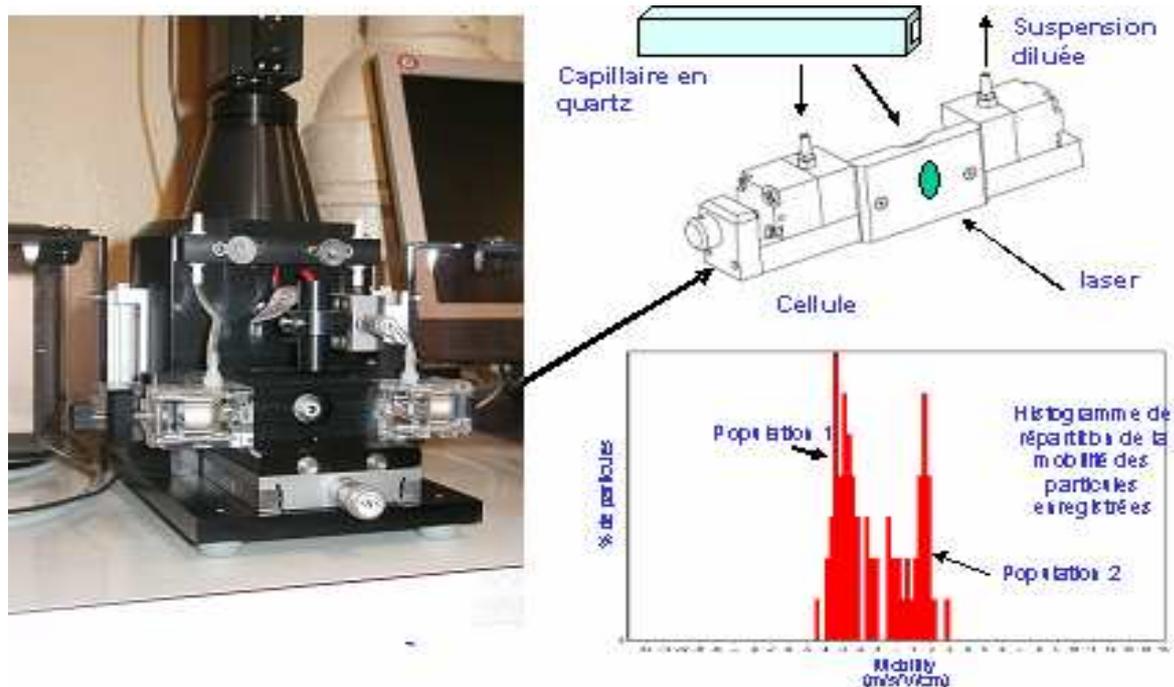


Figure 5-23 : Appareillage de zétamétrie au LCPC

Le résultat des mesures se présente sous la forme d'un histogramme de population. La valeur du potentiel zêta de chaque particule est considérée comme exacte cependant toutes les particules dans une suspension (d'autant plus lorsqu'elle est réalisée à partir d'un sol naturel) ne présentent pas des propriétés de surface identiques, d'où les différentes valeurs de potentiel zêta mesurées et la possibilité de distinguer le comportement de plusieurs populations de particules.

Les mesures sont réalisées en utilisant des suspensions très diluées (de l'ordre de 3-5 mg /500 mL) d'argile de type illite, kaolinite et montmorillonite. L'hydratation des poudres se fait par agitation pendant un temps assez court (maximum 24 h). L'électrolyte choisi pour l'étude est le NaCl et le CaCl₂ afin de mettre en évidence les différences de comportement en présence de sodium ou de calcium. Plusieurs concentrations sont également testées. Le pH des suspensions est ajusté avec des ajouts de base (NaOH 0,1M) ou d'acide (HCl 0,1M). Notez que les matériaux présentent en général, lorsqu'ils sont 'purs', une caractéristique intrinsèque appelé PZC (point of zero charge ou point de charge nulle). Ce PZC correspond au pH pour lequel la charge de la particule est nulle et il correspond, en principe, au PIE ou point iso-électrique mesuré en zétamétrie, c'est-à-dire le pH pour lequel le potentiel zéta est nul.

5.3.4 Résultats des mesures en zétamétrie

Le microélectrophorémètre a été utilisé de plusieurs manières. D'une part, les mesures de potentiel zêta ont été enregistrées pour chacune des argiles en fonction du pH de la suspension, de la concentration en sel ($I = 0,1, 0,01$ ou $0,001M$ ou bien proche de 0 avec l'eau distillée) et de la nature du cation (Ca ou Na). Ces mesures de zétamétrie ont été croisées pour certaines avec des observations de vitesse de sédimentation des suspensions.

D'autre part, le microélectrophorémètre utilise une caméra qui enregistre le mouvement des particules. Cette observation directe des particules permet de donner des indications sur leur état d'agrégation. En effet, à concentration massique en particule solide constante, les clichés au cours des mesures peuvent faire apparaître un nombre plus ou moins important 'd'agrégats' dont la taille augmente. La taille des agrégats est mesurée de manière qualitative à partir des anneaux de diffraction autour des particules sur les clichés (plus ces anneaux de diffractions sont visibles, plus les agrégats sont de grandes tailles).

5.3.4.1 Comportement des argiles de référence (kaolinite, illite et montmorillonite)

La Figure 5-24 présente les potentiels zêta mesurés sur des suspensions de kaolinite, d'illite ou de montmorillonite. Notez que ces argiles ne sont pas pures à 100%.

En effet, si on se reporte aux fiches de caractérisation des matériaux en annexe A, la kaolinite armoricaine est composée à 83% environ de kaolinite, avec un peu d'illite-muscovite et une très faible quantité de quartz. L'illite Arvel est majoritairement composée d'illite-muscovite avec des traces de kaolinite et enfin la montmorillonite Arvel est essentiellement composée de smectites et des traces de palygorskite. Le mélange des phases minérales est sans doute à l'origine d'une certaine hétérogénéité des valeurs de potentiel zêta obtenues (élargissement de la distribution sur la population de particules). Les valeurs de potentiel zêta présentées représentent une moyenne (toutes les phases en présence étant des silicates ou des aluminosilicates, leur potentiel zêta reste assez proche).

En ce qui concerne la reproductibilité des résultats, chaque point de la courbe est une moyenne de 3 mesures consécutives sur la même suspension. Une seconde courbe, réalisée dans les mêmes conditions, produite pour l'illite montre une bonne reproductibilité des mesures. Pour ce qui est de la kaolinite, la seconde courbe produite s'avère différente (même tendance avec des écarts importants). Enfin la reproductibilité de la courbe obtenue sur la montmorillonite n'a pas été testée. Les comportements obtenus restent néanmoins cohérents avec les résultats de la littérature. Des tests ultérieurs ont montré que les problèmes de reproductibilité des mesures sont sans doute liés au mode de préparation des suspensions (nécessite d'un temps d'hydratation et de dispersion des particules plus long que ce qui est appliqué dans notre cas).

Concernant les résultats obtenus dans NaCl 0,01M, le potentiel zêta de la kaolinite (Figure 5-24) varie en fonction du pH du fluide environnant. Il diminue lorsque le pH augmente. Cela veut dire que plus l'environnement est basique, plus la kaolinite est stable sous sa forme dispersée. L'illite a sensiblement le même comportement que la kaolinite mais l'amplitude de la variation de potentiel zêta est plus faible et se limite pratiquement au pH <4. Contrairement à la kaolinite et l'illite, la montmorillonite présente un potentiel zêta assez stable autour de -40 mV quel que soit le pH du milieu.

Ces mesures s'expliquent par la charge de surface de chaque type d'argile. Cette charge se répartit sur les faces latérales des feuillets ou plaquettes (charge positive, négative ou nulle) et sur la surface basale (charge toujours négative). Pour la kaolinite, les surfaces basales et latérales sont presque égales, lorsqu'on diminue le pH (augmente les ions H^+), la charge négative est diminuée par protonation des OH portés par les faces latérales. Donc, le potentiel zêta est diminué. Pour la montmorillonite, la surface basale est beaucoup plus grande que les surfaces représentées par les bords des feuillets. La charge négative est prédominante. Lorsqu'on diminue le pH (augmente les ions H^+), la charge négative sur la surface basale n'est pas influencée, le potentiel zêta reste constant. Il en est presque de même pour l'illite dont la structure est semblable à celle de la montmorillonite. En effet compte tenu de la présence d'ions K^+ entre les feuillets d'illite, qui empêchent l'accès de l'eau aux espaces interfeuillets, les feuillets d'illite s'empilent les uns sur les autres ce qui augmente globalement la surface latérale par rapport à la surface basale accessible (réactive) par la solution. C'est pourquoi on peut observer en milieu acide une diminution sensible du potentiel zêta comme pour la kaolinite.

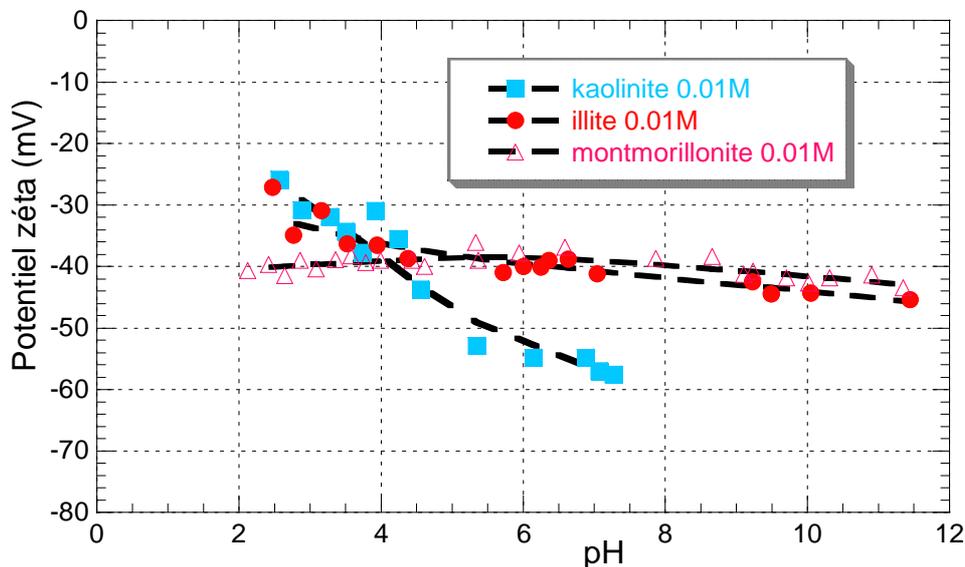


Figure 5-24: Courbes du potentiel zêta obtenues sur les trois argiles testées dans NaCl 0.01M

5.3.4.2 Influence de la concentration du sel sur le potentiel zêta

La concentration en sel NaCl passant de 0,01M (Figure 5-24) à 0,001M (Figure 5-25) à une influence sur la mesure du potentiel zêta. Lorsqu'on diminue le pH, le potentiel zêta de la montmorillonite et de l'illite diminue également ce qui est contraire à ce qui est observée généralement. Une explication est suggérée en relation avec la variation de la force ionique (concentration en sel) en même temps que le pH lorsque de l'acide HCl est ajouté. La force ionique n'est pas suffisamment grande pour stabiliser la conductivité dans la solution qui varie au cours des mesures (la force ionique $I = 0,001 \text{ mol/L}$ reste constante sur la plage de pH 4-10). De plus, le potentiel zêta pour la montmorillonite et l'illite se situe autour de -30 à -20 mV notamment autour des pH neutres ce qui suggère une dispersivité moindre dans une solution pourtant moins concentrée en sel. Cette observation est contraire à la théorie et montre la nécessité de parfaitement contrôler le protocole d'essai des mesures en zétamétrie ainsi que la préparation des suspensions (pureté des solutions, hydratation des matériaux...). Ces contradictions devront être expliquées par de nouvelles mesures.

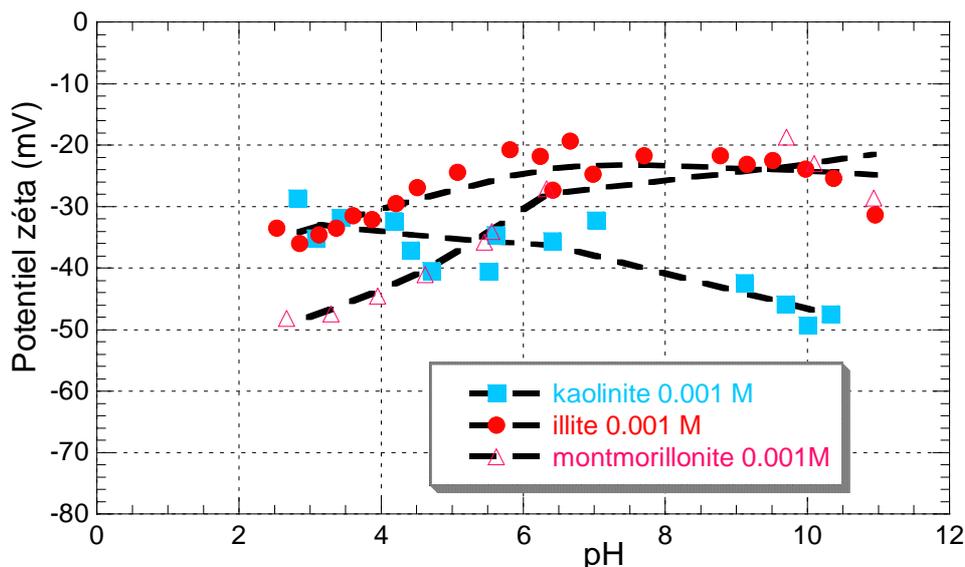


Figure 5-25. Courbe de potentiel zêta des trois types d'argiles avec NaCl 0,001M

L'état d'agrégation des particules peut également être observé directement selon la nature des particules, du pH et de la concentration en sel à partir des enregistrements de la mobilité des particules par le microélectrophorémètre.

Le Tableau 5-9 met en évidence que :

- les particules de kaolinite ont une taille globalement plus grande que les particules de montmorillonite ou d'illite.
- en augmentant le pH, le potentiel zêta devient de plus en plus négatif dans le cas de la kaolinite. Cette évolution s'accompagne par une plus grande dispersion des particules (les particules déflocculent ce qui augmente leur nombre).
- dans le cas de l'illite et de la montmorillonite, les faibles pH sont caractérisés par la floculation des particules (diminution de leur nombre à l'écran). Parallèlement, l'augmentation de la taille des agrégats n'est pas très claire.
- L'augmentation de la force ionique dans les suspensions de kaolinite est corrélée avec une augmentation de la taille des agrégats (les anneaux de diffraction autour des particules sont plus importants) alors que le nombre des particules visibles (agrégats) semble augmenter contrairement à ce que l'on prévoit. Cela est peut être relié au fait que les suspensions à 0,01M et 0,001M ont été réalisées en mélangeant 5 mg de poudre avec l'électrolyte : il est difficile de garder cette quantité très faible identique d'une préparation à une autre ce qui peut expliquer des nombres de particules variables d'une ligne à l'autre du Tableau 5-9. La lecture de ce tableau sur une même ligne n'est pas assujettie à ce problème. Par contre, les particules peuvent sédimenter dans le capillaire au cours de la mesure répétée 3 fois et il est probable que tous les enregistrements n'ont pas été rigoureusement réalisés au même instant après introduction dans le microélectrophorémètre. Aussi, des variations de quantité de particules visibles peuvent être engendrées. Dans le cas de l'illite ou de la montmorillonite, les tailles d'agrégats ou de particules observées sont sensiblement les mêmes. Comme précédemment nous observons une certaine contradiction dans le cas de la montmorillonite en milieu basique où les particules à faible force ionique semblent plus agrégées que celles observées à force ionique plus grande.

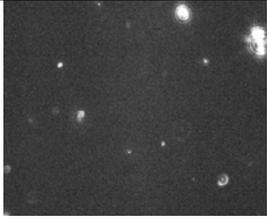
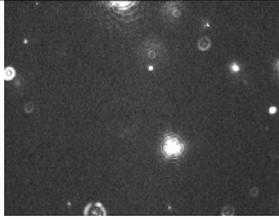
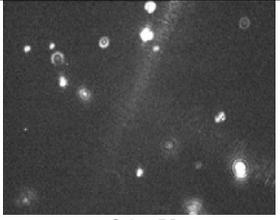
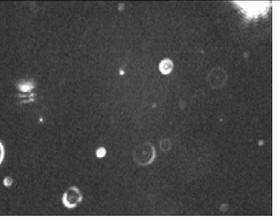
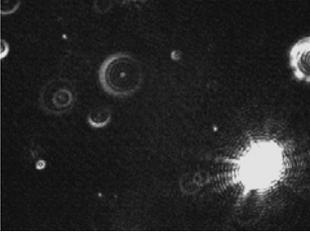
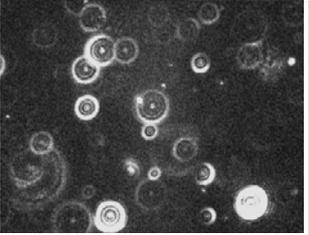
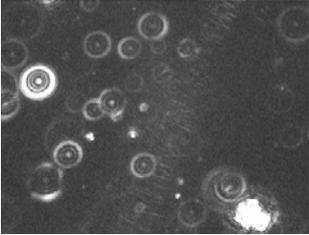
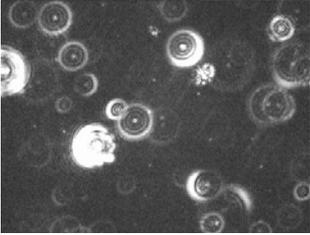
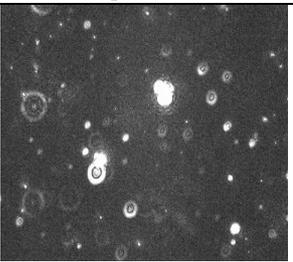
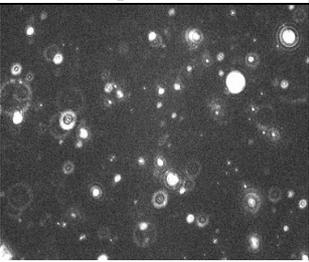
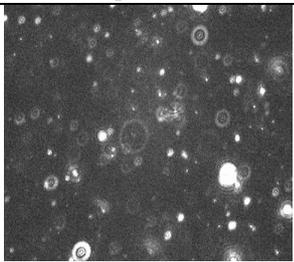
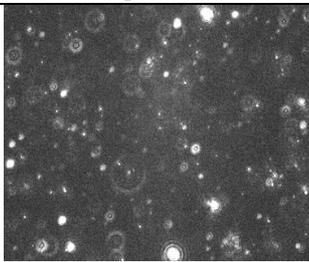
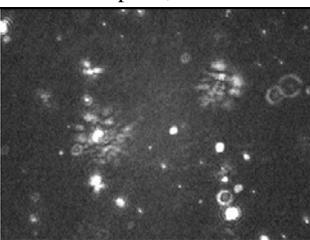
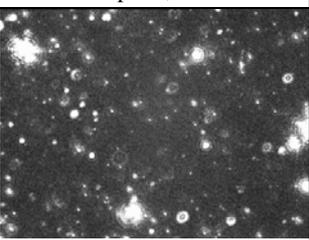
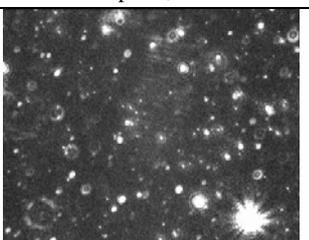
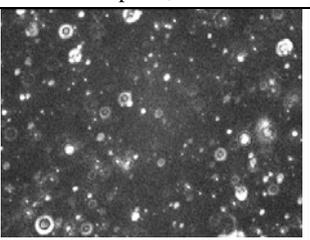
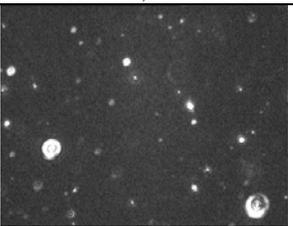
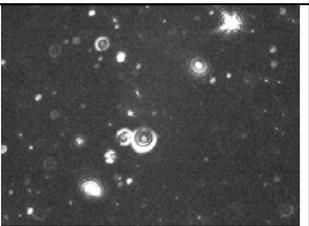
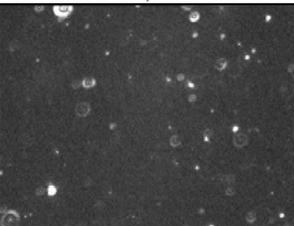
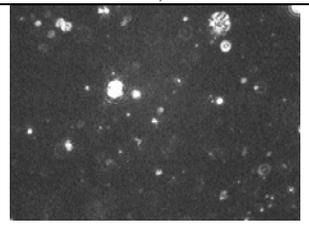
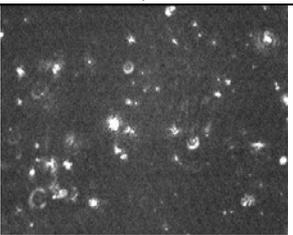
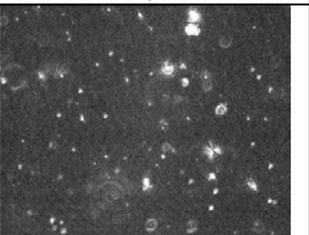
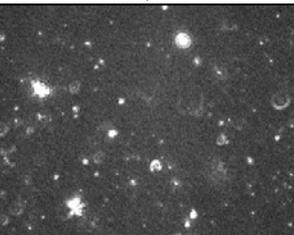
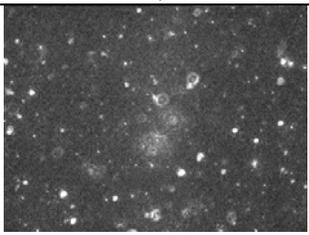
(K) 0,001M (a)	pH 2,8	pH 4,2	pH 6,4	pH 10
	 -29 mV	 -32mV	 -36 mV	 -48 mV
(K) 0,01M (b)	pH 2,6	pH 3,9	pH 6,9	pH 9,7
	 -26 mV	 -31mV	 -55mV	 -46mV
(I) 0,001M (c)	pH 2,5	pH 3,6	pH 7,0	pH 10
	 -34 mV	 -32 mV	 -25 mV	 -24mV
(I) 0,01M (d)	pH 2,3	pH 5,7	pH 7,0	pH 8,6
	 -28mV	 -38mV	 -41mV	 -42mV
(M) 0,001M (e)	2,7	4	5,6	10,1
	 -48mV	 -45 mV	 -34mV	 -23mV
(M) 0,01M (f)	2,1	3,6	6,6	10,9
	 -41mV	 -38mV	 -37mV	 -41mV

Tableau 5-9 : dispersion des particules de kaolinite (K), d'illite (I) et de montmorillonite (M) en fonction du pH et de la concentration $I=0.01M$ (b, d, f) et $I=0.001M$ (a, c, e).

5.3.4.3 Influence de la nature du sel sur le potentiel zêta

Afin de mettre en évidence l'influence de la nature des cations présents en solutions, nous avons mesuré le potentiel zêta en présence de NaNO_3 et de CaCl_2 en milieu neutre c'est-à-dire pour le pH naturel de la suspension (pH 5.5-6.5). Nous avons choisi, non pas de tester les argiles de référence mais trois textures de sols (texture 3, 5 et 8).

Contrairement aux précédentes mesures réalisées sur des suspensions très diluées (quelques milligrammes dispersés dans 500 mL d'électrolyte), les mesures sont réalisées sur les particules contenues dans le surnageant des suspensions concentrées centrifugées préparées à partir des différentes textures. En effet, le microélectrophorémètre ne permettant d'étudier que les particules $< 50\mu\text{m}$, seul le comportement des particules fines contenues dans les textures est observé. Les particules argileuses (issues de la kaolinite) et siliceuses (issues du limon) ayant des comportements électrocinétiques proches (Tableau 5-10), les potentiels zêta sont sensiblement les mêmes quelle que soit la texture pour un fluide donné.

Les expériences de sédimentation (représentées par la texture 8 sur la Figure 5-26) confirment ce résultat car elles ne diffèrent pas d'une texture de sol à une autre. La sédimentation, que nous avons introduite dans notre protocole d'essai nous donne une indication complémentaire sur le caractère dispersif ou au contraire cohésif d'un milieu (solution et particules) à l'échelle macroscopique tandis que le potentiel zêta (que l'on corrèle à la sédimentation) représente ces propriétés à l'échelle microscopique. Si les essais de sédimentation et la zétamétrie montrent peu de différence entre les textures, ils révèlent en contre partie l'impact de la force ionique I (concentration du sel) comme nous l'avons montré dans le paragraphe précédent. Plus I augmente, plus les particules sont cohésives et ont tendance à former des agrégats qui sédimentent rapidement ce qui est d'autant plus clair lorsque la concentration en sel est élevée ($I=0,1\text{M}$). A l'inverse, l'essai de sédimentation dans l'eau distillée avec une force ionique quasi nulle montre une propension très forte des particules fines de la texture 8 à rester dispersées.

La nature du cation en solution (valence et rayon) est également un facteur important. Plus le rapport Ca/Na est important, plus le système est considéré comme cohésif. Nous observons en effet une diminution nette des potentiels zêta (en valeur absolue) selon les milieux à pH neutre dans l'ordre suivant :

$$\{kaolinite\ NaCl\ 0.01M \approx NaNO_3\ 0.01M\} > CaCl_2\ 0.01M > NaNO_3\ 0.1M > CaCl_2\ 0.1M.$$

Nous confirmons ainsi le fait que les ions calcium favorisent la floculation/agrégation des particules et qu'il est important de considérer le rapport Ca/Na caractérisant le fluide dispersif ou érodant.

Tableau 5-10. Rôle de la concentration en sel et de la nature du sel en solution sur les mesures de zétamétrie. Corrélation avec l'enregistrement de la sédimentation des suspensions.

	eau distillée*	0.01M		0.1M	
		NaNO_3	CaCl_2	NaNO_3	CaCl_2
Solutions	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Texture 3 limono-argileuse	-36 mV	-53 mV	-50 mV	-22 mV	-16 mV
Texture 5 argilo-sableuse	-17mV	-36 mV	-51 mV	-22 mV	-7 mV
Texture 8 argileuse	-8 mV	-42 mV	-41 mV	-17 mV	-8 mV

(*) très forte hétérogénéité des mesures rendant les résultats non-représentatifs.

Les mesures réalisées en présence d'eau distillée restent difficiles à interpréter compte tenu de leur non reproductibilité. En effet, l'eau distillée a une conductivité quasi nulle ce qui perturbe fortement les mesures et ne permet pas de déterminer correctement le pH de la suspension. L'eau distillée reste un cas à part puisque sa composition est très éloignée de celle rencontrée dans les fluides dispersant naturels de type eau de rivière. Toutefois il s'agit du fluide utilisé dans le crumb test amélioré.

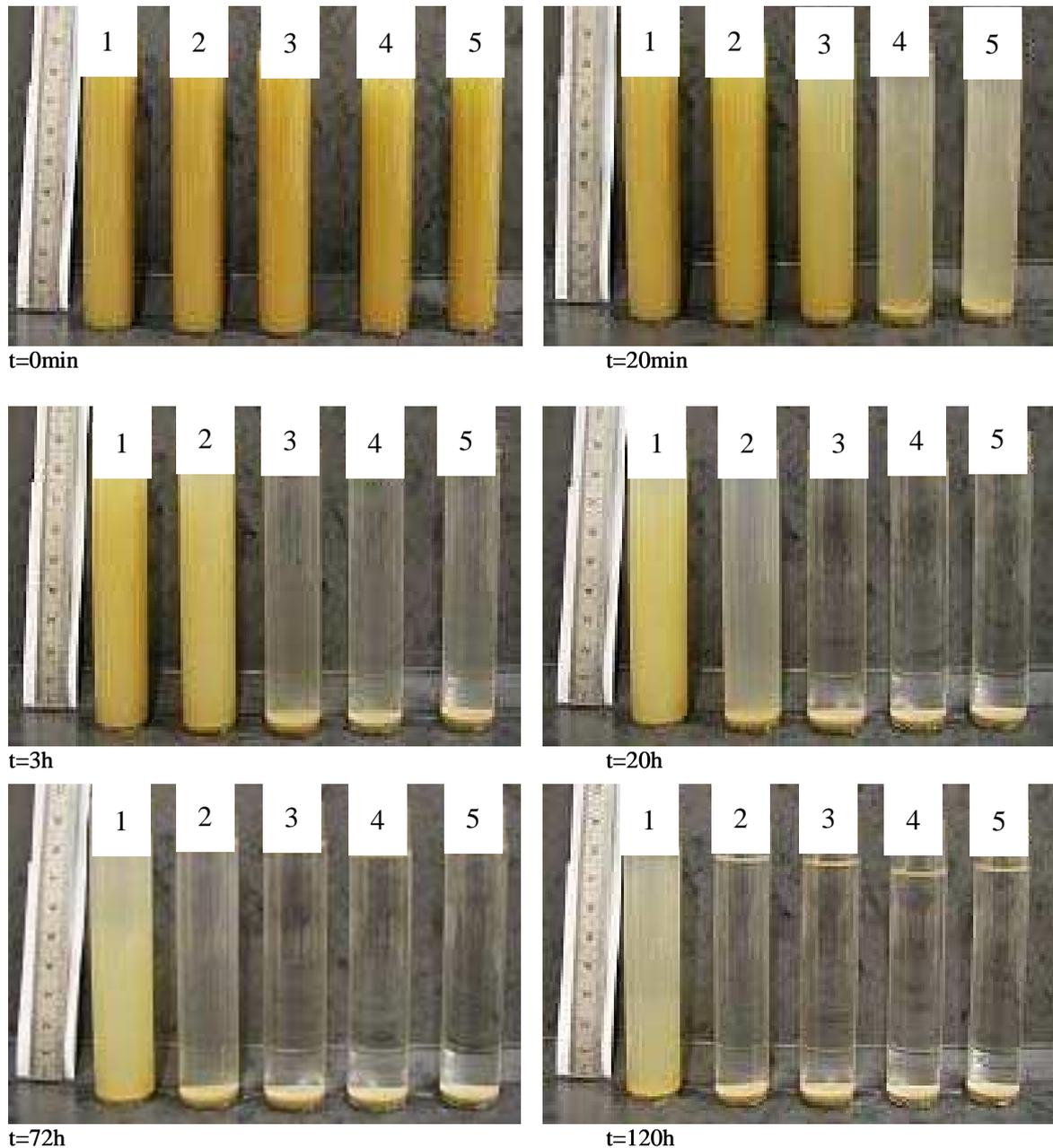


Figure 5-26. Résultats des essais de sédimentation sur la texture 8 argileuse (70% d'argile kaolinite/ 20% de limon, 10% de sable). Les tubes de gauche à droite représentent les solutions 1 à 5 décrites dans le Tableau 5-10.

5.3.4.4 Apport de la zétamétrie pour la caractérisation des particules fines issues d'un sol naturel : exemple du remblai de Montoire-sur-le-Loir

Des mesures de potentiel zêta couplées à l'observation de la dispersion des particules à l'aide du microscope de l'électrophorémètre ont été enregistrées sur le sol du remblai de Montoire.

Ce sol est composé essentiellement de quartz que l'on retrouve dans la fraction fine $<2\mu\text{m}$ qui représente pratiquement 55% du sol selon la courbe granulométrique présentée en annexe A. Des feldspaths et de la calcite sont également détectés de même que des argiles de type kaolinite (25% de la fraction argileuse), montmorillonite (70% de la fraction argileuse) et interstratifié montmorillonite /kaolinite (5% de la fraction argileuse). L'indice de plasticité de 21 du sol confirme cette composition riche en argile gonflante.

Le potentiel zêta mesuré sur le surnageant des suspensions centrifugées réalisées à partir du sol du remblai de Montoire-sur-le-Loir (Figure 5-27 et Figure 5-28) apparaît presque constant quel que soit le pH. Son évolution en présence d'eau salée est assez semblable ce qui correspond au comportement observé avec la montmorillonite (Figure 5-24 et Figure 5-25). Une évolution du potentiel zêta pour les pH acides n'est pas enregistrée comme c'est le cas d'une kaolinite pure. On peut également observer la présence de particules de tailles différentes (les plus visibles sont associées à la kaolinite et les plus petites à la montmorillonite). On peut également observer une évolution des tailles de particules en fonction du pH (les particules sont floculées en dessous de pH 5). L'effet de la teneur en sel est moins visible quant à lui.

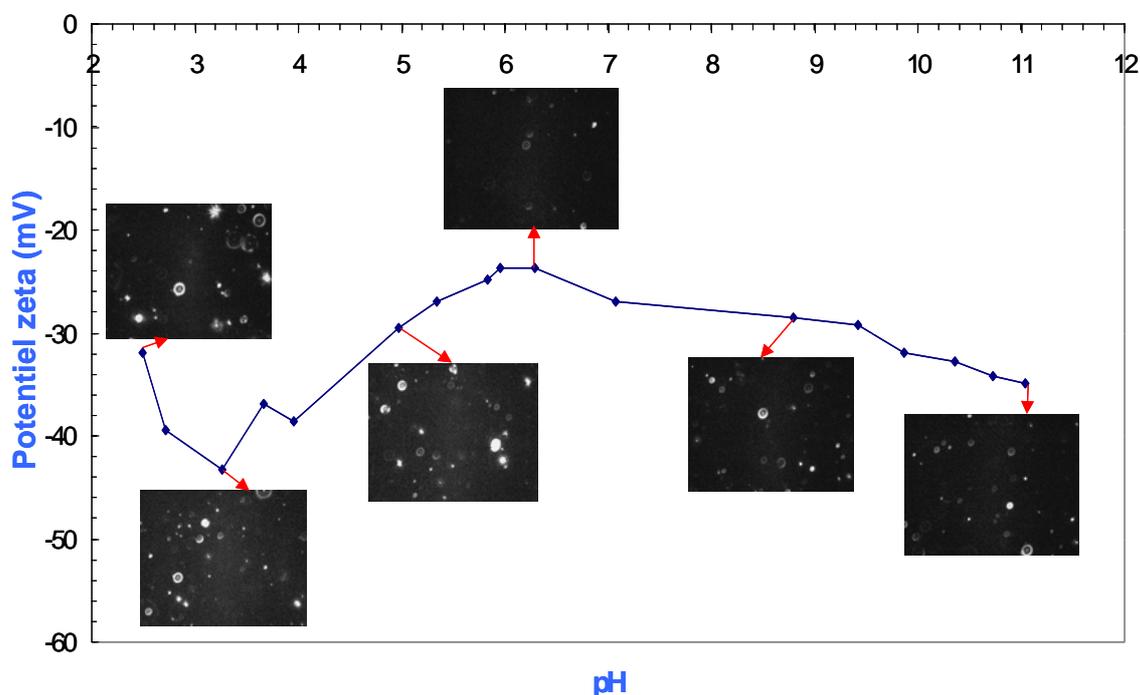


Figure 5-27: Potentiel zêta sur les particules fines du sol du remblai de Montoire sur Loir (électrolyte: eau distillée)

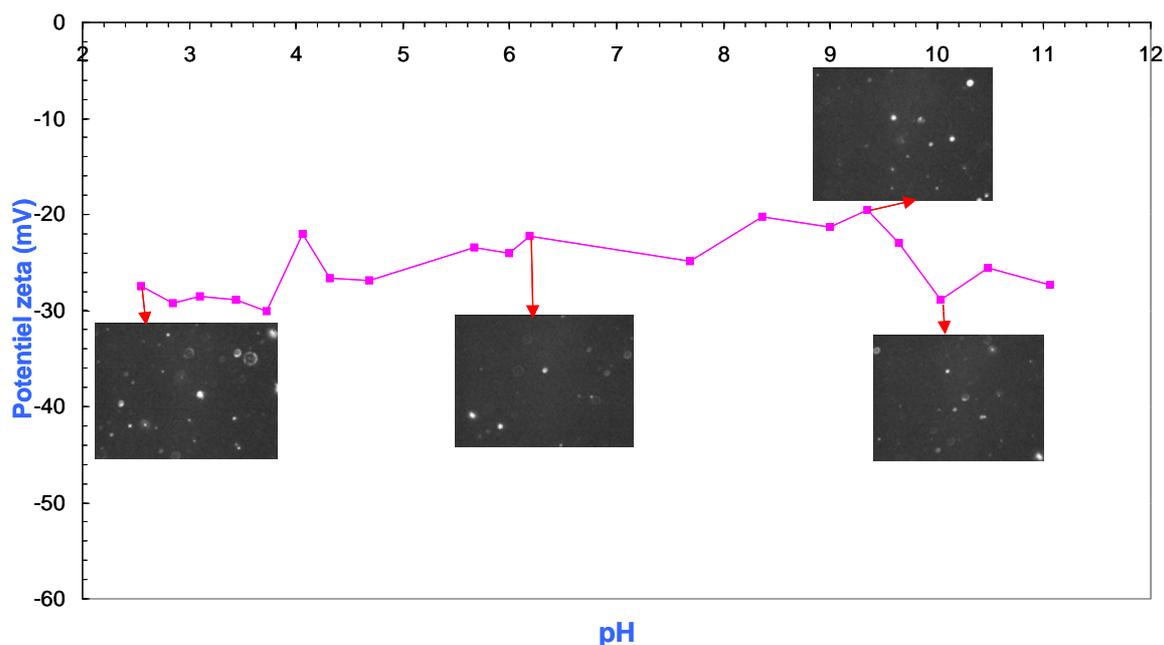


Figure 5-28 : Potentiel zêta sur les particules fines du sol du remblai de Montoire (électrolyte: NaCl à 6g/L)

Les mesures de potentiel zêta sur ce sol naturel ont donc permis de mettre en évidence le comportement de la phase majeure constitutive de la fraction fine $<2\mu\text{m}$. En réalisant au préalable une bibliothèque des comportements électrocinétiques des principales phases minérales rencontrées dans un sol naturel, il est alors possible de donner une ou plusieurs proposition sur la nature des phases en présence. En recueillant par ailleurs l'eau présente sur le site, voire en l'analysant, les mesures de potentiel zêta permettent de donner une idée des interactions entre particules fines du sol et leur état de stabilité (état agrégé, floculé ou dispersé). Dans notre cas les particules ont des potentiels zêta suffisamment négatifs pour que les particules restent dispersées en suspension (tendance à la dispersion favorisée également par les pH proches de la neutralité rencontrés dans les milieux naturels).

5.3.5 Conclusions et poursuite de l'étude

La mesure du potentiel zêta permet de décrire plus finement le comportement des particules selon la nature du fluide en contact. En couplant ces mesures avec l'observation directe de l'état de dispersion des particules via le microscope du microélectrophorémètre et les essais de sédimentation (qui pourraient être développés en utilisant une caméra), il est possible d'obtenir des indications sur la tendance à la dispersion au non des particules fines d'un sol naturel ou non. Cette technique ne permet cependant pas de tester la texture dans son ensemble et ne donne que des indications d'ordre chimique ou électrostatique.

Malgré les difficultés rencontrées en terme de reproductibilité des mesures (protocole de mesure), les premières expériences ont montré l'influence de la concentration en sel sur la dispersion des particules. Les phénomènes observés sont en relation avec la contraction de la double couche. Comme l'ont montré Reddi *et al.* (2000), plus la force ionique augmente, plus le milieu est résistant à l'érosion. La nature du cation présent en solution et le rapport Ca/Na

sont également des paramètres dont il faut tenir compte (le calcium a tendance à diminuer la dispersion des particules fines).

Enfin, la notion de dispersion utilisée en zétamétrie se rapproche de la dispersion observée lors des essais de double hydrometer test. Dans ce dernier cas, la dispersion est à considérer dans le sens de « sensibilité à l'action d'un flocculant ».

Après ces premiers essais prometteurs et l'amélioration du mode opératoire de la zétamétrie pour rendre plus fiable l'appareillage, il sera intéressant de croiser les mesures de zétamétrie avec des essais avec le Hole Erosion Test ou l'Erodimètre à Jets Mobiles réalisés avec d'autres fluides érodants. Cela devrait permettre de montrer l'impact des interactions chimiques dans le processus d'érosion et non plus seulement lors de la dispersion.

5.4 CONCLUSIONS

Nous avons mis en œuvre, dans ce chapitre un certain nombre d'essais destinés à caractériser la dispersion des sols étudiés dans notre programme expérimental.

Nous avons dans un premier temps utilisé les protocoles des normes ASTM sur nos textures de références et montré que ces derniers n'étaient pas forcément adaptés à ces textures pas assez argileuses pour la plupart. De plus l'approche qualitative de ces essais se prête mal à une étude plus fine des phénomènes de dispersion.

Nous avons alors proposé un nouvel essai d'émiettage destiné à répondre à la question de la dispersion pour une plus grande variété de textures et à rendre des valeurs plus quantitatives.

Nous avons ensuite testé cet essai sur toutes les textures de sols reconstitués envisagés dans le présent travail. Nous avons ainsi montré comment le pourcentage d'argile, la nature de l'argile et le fluide interstitiel intervenait dans les essais. Cela se révèle particulièrement important eu égard à la variété des situations potentiellement rencontrées sur le terrain : érosion maritime, fluviale ou pluie ; nature des terrains naturels, nature et mode de conception des remblais ou des digues...

Dans une dernière partie nous nous sommes intéressés à l'apport de la zétamétrie pour mesurer l'interaction entre les particules les plus fines dans différents environnements et les relier aux observations faites dans les autres essais.

Chapitre 6 : Synthèse et comparaison des résultats d'essais d'érosion et de dispersion

Dans les trois chapitres précédents, nous avons vu que les phénomènes d'érosion et de dispersion ont été étudiés au travers des essais mécaniques, physiques et physico-chimiques sur les différents types de sol, de l'échelle macroscopique à microscopique, par des appareillages conçus et développés au LCPC.

Notre programme de recherche s'est intéressé au processus d'érosion et dispersion des sols argileux à l'aide de différents types d'essais :

- essai d'érosion par jets avec l'érodimètre à jets mobiles LCPC (EJM)
- essai d'érosion avec l'essai de trou LCPC (HET)
- essai de dispersion avec le pinhole test, le crumb test, le double hydrometer test (DHT), la zétamétrie et l'essai d'émiettage LCPC adapté lors de ce travail pour avoir des mesures quantitatives.

Afin de comprendre les mécanismes en jeu et de comparer ces phénomènes, tous les types d'essais ont été menés avec les mêmes textures des sols. Ces travaux de thèse se sont concentrés sur l'étude des influences de la texture du sol, du pourcentage de fines dans le mélange, de la nature de l'argile et du type de fluide érodant sur les processus d'érosion et de dispersion. Les études bibliographiques ont montré l'importance de ces paramètres sur l'érosion et dispersion : le pourcentage d'argile dans mélange un sablo-argileux (Christensen et Das, 1973), la nature des argiles (Lefebvre *et al.*, 1985, 1986), l'influence des propriétés du fluide (Arulanandan *et al.*, 1973, 1975 ; Holmgren et Flanagan, 1977 ; Wan et Fell, 2002, 2004).

Nous revenons dans ce chapitre sur les résultats des différents types d'essai sur les mêmes sols. Les résultats obtenus lors des essais d'érosion avec l'EJM sont comparés avec ceux recueillis lors des essais d'érosion avec le HET et sont également mis en perspective avec ceux des essais de dispersion.

6.1 SYNTHÈSE DES RESULTATS D'ESSAIS

La synthèse des résultats des différents types d'essai d'érosion et de dispersion est présentée dans le Tableau 6.1.

Concernant l'érosion par jets, les essais ont été réalisés avec l'Erodimètre à Jets Mobiles en laboratoire sur les textures de référence et *in situ* lors de trois campagnes d'essais. Les essais menés ont permis de valider notre nouveau protocole d'essai en laboratoire et également sur le site. En laboratoire, nous avons trouvé que la masse érodée pendant l'essai change d'une texture à l'autre. Dans les essais *in situ*, les différents types de traitement du sol ont conduit à une vitesse d'érosion différente. Le taux d'érosion au cours du temps de chaque type de sol a été calculé.

Concernant l'érosion de surface, les essais ont été effectués avec le « Hole Erosion Test » en laboratoire sur les textures différentes avec trois types d'argiles. Les résultats obtenus ont permis de valider la robustesse de notre approche. La loi d'érosion pour le mélange avec les argiles de type kaolinite et illite a été proposée. Cette loi est une loi linéaire de seuil qui a été trouvée par l'estimation de l'évolution du diamètre du trou au cours de l'essai à l'aide d'un paramètre important : la turbidité de l'eau à l'aval de l'échantillon. Pour que le phénomène d'érosion interne se déclenche, la force hydraulique de l'écoulement doit dépasser une valeur de contrainte de cisaillement critique (le seuil) τ_c , qui change d'une texture de sol à l'autre. Une fois que l'érosion se développe, elle est caractérisée par le coefficient d'érosion k_{er} qui représente la vitesse d'érosion. Nos résultats ont montré que les valeurs de τ_c et k_{er} dépendent du pourcentage d'argile dans le mélange.

La contrainte de cisaillement critique τ_c augmente avec le pourcentage d'argile, cela veut dire que plus le sol est argileux, plus la valeur de la force hydraulique doit être élevée pour initier l'érosion. Au contraire de la contrainte de cisaillement critique τ_c , le coefficient d'érosion diminue quand le pourcentage d'argile augmente.

Le mélange avec l'argile de type illite semble plus résistant à l'érosion que la texture avec l'argile de type kaolinite. Avec un même pourcentage d'argile, la valeur de τ_c de l'illite est beaucoup plus élevée que celle de la kaolinite (200 fois plus), au contraire, la valeur k_{er} est beaucoup plus faible pour le cas de l'illite (100 fois moins). Cette remarque est confirmée par les observations de l'échantillon avant l'érosion par le MEBE. A l'échelle microscopique, le ciment argileux dans la matrice de sol avec l'illite apparaît beaucoup plus compact et cohésif que le sol avec la kaolinite. Après l'érosion, la texture avec l'illite ne présente pas de trace importante d'érosion tandis que le matériau avec la kaolinite montre l'empreinte de grains arrachés de la matrice par l'écoulement.

Pour le mélange avec l'argile de type montmorillonite, nous n'avons pas pu pratiquer l'essai à cause du caractère gonflant de cette argile.

Concernant la dispersion des sols, les essais classiques de dispersion tels que le Pinhole Test, le Crumb Test, le Double Hydrometer Test (DHT) nous ont donné des résultats intéressants mais de caractère qualitatif. Notre travail a permis d'améliorer l'essai d'émiettement à partir du Crumb Test afin d'avoir accès à un aspect quantitatif, alors qu'auparavant cet essai n'était que qualitatif. Des mesures du potentiel zêta à l'aide de la zétamétrie nous ont donné une méthode simple de mesure de la dispersion des sols fins.

Tableau 6.1 : Synthèse des résultats d'essais d'érosion et de dispersion

Type de sol		Essai d'érosion		Essai de dispersion					
		externe	interne	protocole classique			nouveau protocole		
		<i>EJM</i>	<i>HET</i>	<i>Pinhole Test</i>	<i>Crumb Test</i>	<i>DHT</i>	<i>Essai d'émiettage</i>	<i>Zétamétrie</i>	
Sol reconstitué au laboratoire	Mélange : Sable, Argile	K10S90					$t_a = 0$ min ; $h_f = 16$ mm		
		K30S70		$\tau_c = 0$ Pa ; $k_{er} = 7,7 \cdot 10^{-4}$ s/m				$t_a = 11$ min ; $h_f = 9$ mm	
		K50S50		$\tau_c = 10$ Pa ; $k_{er} = 5,6 \cdot 10^{-4}$ s/m				$t_a = 13$ min ; $h_f = 8$ mm	
		K70S30		$\tau_c = 20$ Pa ; $k_{er} = 4,7 \cdot 10^{-4}$ s/m				$t_a = 22$ min ; $h_f = 8$ mm	
		K90S10						$t_a = 24$ min ; $h_f = 6$ mm	
		K100		$\tau_c = 50$ Pa ; $k_{er} = 3,2 \cdot 10^{-4}$ s/m			D	$t_a = 23$ min ; $h_f = 8$ mm	$\zeta = -55$ mV
		I10S90						$t_a = 0$ min ; $h_f = 16$ mm	
		I25S75		$\tau_c = 150$ Pa ; $k_{er} = 2 \cdot 10^{-4}$ s/m				$t_a = 0$ min ; $h_f = 10$ mm	
		I30S70		$\tau_c = 220$ Pa ; $k_{er} = 0,9 \cdot 10^{-4}$ s/m				$t_a = 1$ min ; $h_f = 8$ mm	
		I70S50						$t_a = 25$ min ; $h_f = 6$ mm	
		I90S10						$t_a = 26$ min ; $h_f = 5$ mm	
		I100						-	$\zeta = -41$ mV
		M10S90						$t_a = 0$ min ; $h_f = 12$ mm	
		M30S70		argile gonflante				$t_a = 12$ min ; $h_f = 8$ mm	
		M50S50		argile gonflante				$t_a = 65$ min ; $h_f = 6$ mm	
		M70S30						$t_a = 66$ min ; $h_f = 3$ mm	
	M90S10						$t_a = 160$ min ; $h_f = 2$ mm		
	M100						-	$\zeta = -37$ mV	
	Mélange : Sable, Limon, Argile	Texture 1	très érodable	<i>très érodable</i>	D ; $m_\epsilon = 28$ g	ND	ND	$t_a = 0$ min ; $h_f = 13$ mm	
		Texture 2	très érodable	<i>très érodable</i>	D ; $m_\epsilon = 25$ g	ND	ND	$t_a = 0$ min ; $h_f = 10$ mm	
		Texture 3	très érodable	<i>très érodable</i>	D ; $m_\epsilon = 17$ g	ND	ND	$t_a = 1$ min ; $h_f = 12$ mm	
		Texture 4	très érodable	$m_\epsilon = 10$ g	PD ; $m_\epsilon = 10$ g	ND	PD	$t_a = 0$ min ; $h_f = 11$ mm	
		Texture 5	moyennement érodable	$m_\epsilon = 4$ g	PD ; $m_\epsilon = 3$ g	ND	ND	$t_a = 3$ min ; $h_f = 9$ mm	
		Texture 6	très érodable	$m_\epsilon = 3$ g	PD ; $m_\epsilon = 3$ g	ND	PD	$t_a = 6$ min ; $h_f = 10$ mm	
		Texture 7	moyennement érodable	$m_\epsilon = 1$ g	ND ; $m_\epsilon = 5$ g	ND	D	$t_a = 16$ min ; $h_f = 6$ mm	
		Texture 8	-	$m_\epsilon = 1$ g	ND ; $m_\epsilon = 0,4$ g	ND	D	$t_a = 7$ min ; $h_f = 8$ mm	
Sol in situ	Montoire	Argile (K,M)	moyennement érodable					$\zeta = -25$ mV	
	Site 1	Limon argileux	très érodable						
	Site 2	Limon sableux	très érodable						

Nota : en italique : ancien appareillage,

EJM : érodimètre à jets mobiles LCPC, HET : essai de trou LCPC, DHT : Double Hydrometer Test

τ_c : contrainte de cisaillement critique ; k_{er} : coefficient d'érosion,

m_ϵ : masse érodée finale,

ND : non dispersif ; PD : probablement dispersif ; D : dispersif,

t_a : temps pour atteindre la phase d'affaissement de l'échantillon ; h_f : valeur maximale d'affaissement,

ζ : potentiel zêta, valeur présentée du ζ est prise à pH = 7 et à la concentration de l'électrolyte 0,01M.

6.2 COMPARAISON DES ESSAIS « HET » et « EJM »

Les essais réalisés avec l'EJM (Erodimètre à Jets Mobiles) ont été comparés aux essais HET (Essai d'Erosion de Trou) sur cinq textures différentes de sols.

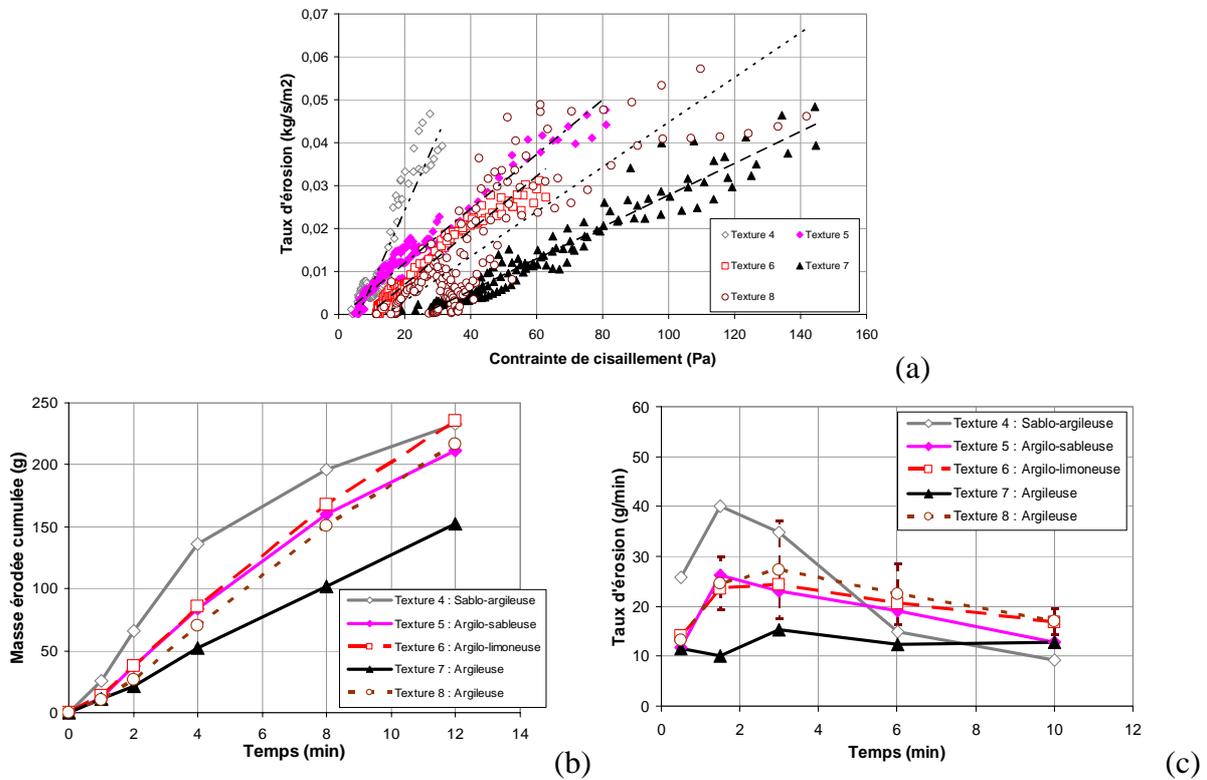


Figure 6.1 : Comparaison des résultats a) HET et b,c) EJM

La Figure 6.1 présente les résultats obtenus avec le HET (a) et avec l'EJM (deux représentations : b,c)

Les données obtenues avec le HET sont bien caractérisées. En particulier, la sensibilité à l'érosion peut être évaluée grâce à la contrainte critique de cisaillement et au coefficient d'érosion. S'agissant de l'EJM, même si l'essai est simple d'emploi et le comportement des courbes d'érosion relativement facile à expliquer, la déduction de paramètres d'érosion explicites n'est pas aisée pour autant. Nous allons donc chercher à relier les deux essais par une approche simple des mécanismes se produisant dans l'essai EJM.

6.2.1 Coefficient d'érosion (HET) et taux initial d'érosion (EJM)

L'un des deux paramètres caractérisant le HET est le coefficient d'érosion k_{er} . Lorsque l'érosion est pleinement avérée (i.e. pour des contraintes de cisaillement bien plus grandes que τ_c), ce coefficient reflète la capacité d'une élévation de contrainte à éroder encore plus le sol. C'est également le seul paramètre qui caractérise l'érosion loin de τ_c . La figure 6.2a représente le coefficient d'érosion obtenu pour les différentes textures.

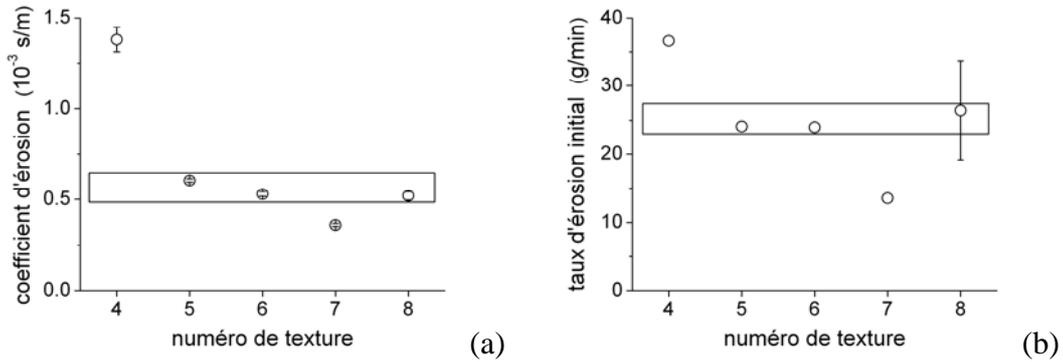


Figure 6.2 : Comparaison des essais : a) coefficient d'érosion (HET) et b) taux d'érosion initial (EJM).

Pour l'EJM, l'érosion est plus importante aux premiers temps de l'essai puisque les rainures sont alors peu profondes. Pour caractériser l'érosion « loin de la contrainte critique de cisaillement », nous avons donc choisi d'examiner le taux d'érosion au début de l'essai (ou « taux d'érosion initial »). Ce dernier est la moyenne du taux d'érosion entre 1 et 4 minutes (voir figure 6.1c). Comme noté précédemment, nous ne considérons pas les tout premiers stades de l'essai (i.e. la première minute) qui ne sont pas représentatifs de l'érosion. La figure 6.2b représente ces taux d'érosion initiaux.

La comparaison des figures 6.2a et 6.2b montre une bonne corrélation qualitative entre les résultats issus du HET et de l'EJM. Un taux d'érosion initial (EJM) plus élevé était attendu pour les forts coefficients d'érosion (HET) et c'est bien ce qui est observé. Ainsi, la texture 4 présente le coefficient d'érosion le plus élevé et le plus haut taux d'érosion initial alors que la texture 7 en présente les plus bas. De plus, dans les deux cas, les paramètres des textures 5, 6 et 8 ne sont pas clairement distincts.

6.2.2 Contrainte critique de cisaillement (HET) et masse érodée finale (EJM)

Le deuxième paramètre caractérisant le HET est la contrainte critique de cisaillement τ_c . Elle représente la contrainte qu'il est nécessaire de dépasser pour éroder le sol. La figure 6.3a représente ce paramètre pour les différentes textures.

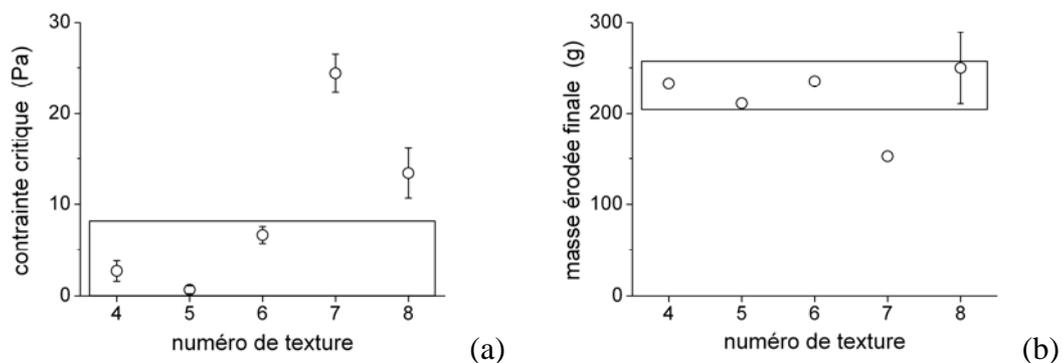


Figure 6.3 : Comparaison des essais: a) contrainte de cisaillement critique (HET) et b) masse finale érodée (EJM).

Pour l'EJM, l'efficacité de l'érosion diminue avec le temps puisque les rainures remplies d'eau sont plus profondes et que l'action des jets d'eau est donc de moins en moins importante. Si l'essai durait suffisamment, nous pourrions même nous attendre à ce que il n'y ait plus d'érosion, la contrainte sur les parois des rainures n'étant alors plus suffisante. Ainsi, la masse érodée cumulée finale (à 12 min dans le protocole EJM) peut être liée à la contrainte critique de cisaillement. La figure 6.3b représente cette masse.

La comparaison des figures 6.3a et 6.3b montre une corrélation qualitative plutôt bonne entre les résultats issus du HET et de l'EJM. Une masse érodée finale (EJM) plus importante pouvait être attendue pour les contraintes critiques (HET) faibles et c'est ce qui est observé pour la plupart des textures. En particulier, il convient de noter que contrairement à la comparaison précédente (figure 6.2ab), les résultats de la texture 4 issus de l'EJM et du HET ne sont pas distincts de ceux des textures 5 et 6. Cette observation valide en partie la distinction faite entre taux d'érosion initial et masse érodée finale pour l'EJM qui trouve sa correspondance dans celle faite entre coefficient d'érosion et contrainte critique pour le HET. Les résultats sur la texture 8 sont plus difficiles à interpréter et souligne probablement certaines limites de cette comparaison.

6.3 COMPARAISON DU PHENOMENE D'EROSION ET DE DISPERSION

6.3.1 Comparaison entre l'essai à l'EJM, au HET et le Double Hydrometer Test

Les essais d'érosion préliminaires à l'EJM et au HET ont montré la résistance très faible à l'érosion de la texture sableuse (texture 1), de la texture limono-sableuse (texture 2) et de la texture sablo-argileuse (texture 3). La cause en est le faible pourcentage d'argile dans le mélange. Celui-ci n'est pas suffisant pour créer des liaisons résistantes à l'action de l'eau entre les grains sableux ou limoneux (Tableau 6.2).

Dans l'essai de dispersion de DHT, ces trois textures mentionnées ne sont pas dispersives au sens physico-chimique (Tableau 6.3) parce que l'ensemble de la fraction fine (argile) est floculée sur les grosses particules (sable ou limon). Il manque des particules fines qui jouent le rôle de ciment entre les particules sableuses ou limoneuses.

Tableau 6.2 : Composition de trois textures du sol

No	Texture	Pourcentage des composants		
		% Argile	% Limon	% Sable
1	Sableuse	10	20	70
2	Limono-sableuse	15	45	40
3	Limono-argileuse	25	60	15

Tableau 6.3 : Résultats de trois textures du sol dans le DHT

No	Texture	% passant 5 μm			% dispersion	Niveau de dispersion
		initial	avec défloculant	sans défloculant		
1	Sableuse	11	8	0	0	non dispersif (ND)
2	Limono-sableuse	22	14	0	0	non dispersif (ND)
3	Limono-argileuse	32	25	0	0	non dispersif (ND)

6.3.2 Comparaison entre l'essai au HET et l'essai d'émiettage

6.3.2.1 Mélange : sable et kaolinite

La Figure 6.4 présente les résultats obtenus pour différents mélanges de sable et de kaolinite avec le HET et l'essai d'émiettage modifié.

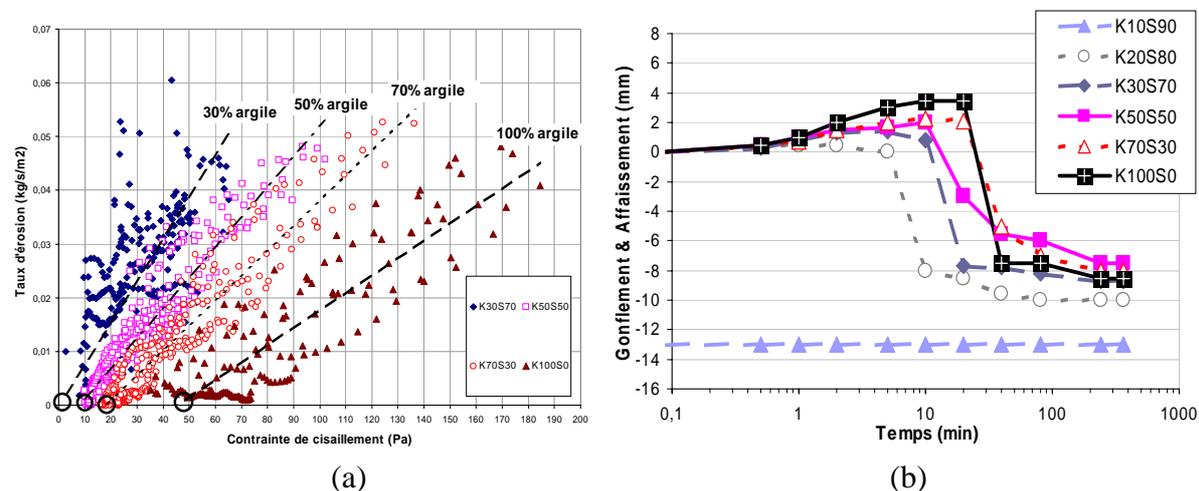


Figure 6.4 : Comparaison des résultats avec l'argile kaolinite : a) HET et b) essai d'émiettage

L'essai avec le HET n'est réalisable qu'avec un pourcentage d'argile supérieur ou égal à 30% dans le mélange. Dans l'essai d'émiettage, à partir de 30% d'argile, il apparaît le gonflement dans l'échantillon, l'affaissement n'est pas immédiat. En dessous de cette valeur, l'échantillon s'affaisse rapidement lorsqu'il est en contact avec l'eau.

La valeur de contrainte de cisaillement critique augmente avec le pourcentage d'argile dans le HET, le temps d'affaissement croît avec la fraction d'argile dans l'essai d'émiettage.

Le taux d'érosion diminue en augmentant la fraction d'argile dans le HET, la valeur d'affaissement final augmente avec la proportion d'argile dans l'essai d'émiettage.

6.3.2.2 Mélange : sable et illite

La Figure 6.5 présente les résultats obtenus pour différents mélanges de sable et d'illite avec le HET et l'essai d'émiettage modifié.

Dans l'essai au HET, les textures sont résistantes à l'érosion (les valeurs de la contrainte de cisaillement critique sont très élevées) tandis que dans l'essai d'émiettage, les textures sont assez inertes dans le fluide, l'eau a des difficultés pour entrer dans la structure de l'échantillon à cause de son imperméabilité élevée ce qui est confirmé par les observations au MEBE. Dans l'essai d'émiettage, le gonflement de toutes les textures est minime.

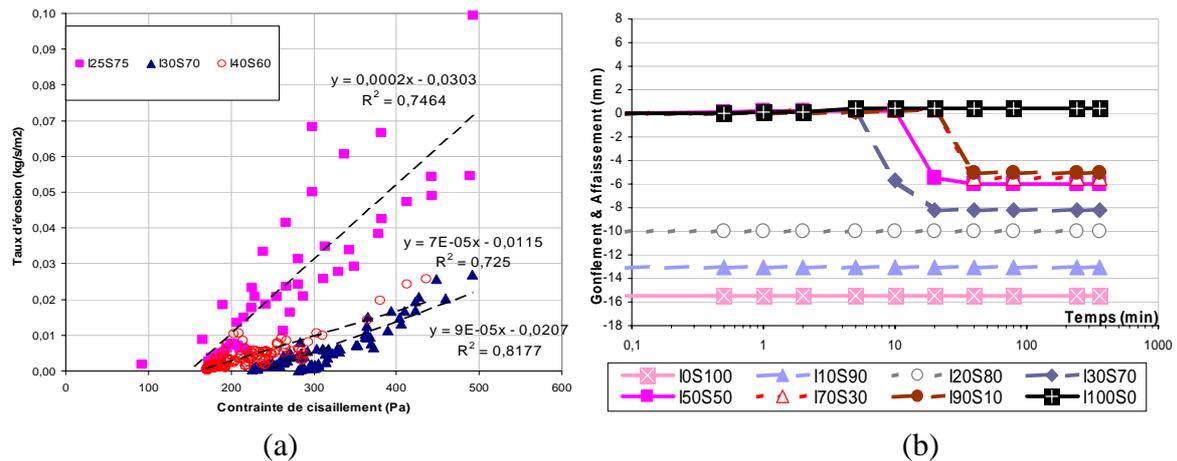


Figure 6.5 : Comparaison des résultats avec l'argile illite : a) HET et b) essai d'émiettage

6.3.2.3 Mélange : sable et montmorillonite

La Figure 6.6 présente les résultats obtenus pour différents mélanges de sable et de montmorillonite avec le HET et l'essai d'émiettage modifié.

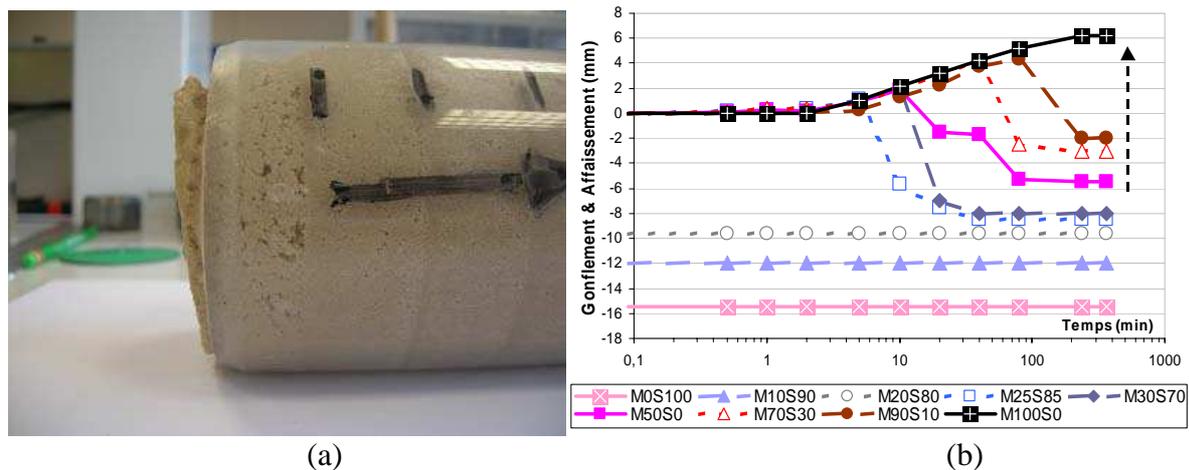


Figure 6.6 : Comparaison des résultats avec l'argile montmorillonite : a) HET et b) essai d'émiettage

Dans l'essai au HET, le sol gonfle beaucoup jusqu'à obturer le trou empêchant la continuation de l'essai. Il s'agit d'une illustration claire du phénomène de cicatrisation qui est utilisé pour les parois ou membranes d'étanchéité mises en œuvre dans certaines applications industrielles de stockage.

Le phénomène de gonflement est mis en évidence de manière très nette les résultats de l'essai d'émiettage pour l'argile pure, dont la durée fixée par le protocole s'avère insuffisante pour observer l'effondrement de l'échantillon.

Ces deux essais sont donc en parfaite cohérence quelle que soit la nature minéralogique de la fraction argileuse du matériau soumis à l'érosion ou à la dispersion.

6.4 CONCLUSIONS

Après avoir comparé les résultats d'essais d'érosion et de dispersion, il apparaît clairement que ces phénomènes sont étroitement en corrélation. L'érosion par HET ou EJM est le même phénomène d'arrachement et de transport des particules de la surface (peut être à l'extérieur ou dans la masse du sol) par l'écoulement d'un fluide. Ces deux phénomènes peuvent être caractérisés par une contrainte de cisaillement critique à l'interface eau-sol qui représente le seuil de déclenchement d'érosion et par un coefficient d'érosion qui représente la dynamique de l'érosion. Le phénomène de dispersion comprend le gonflement, la désagrégation qui mène à la destruction de la structure reflète le comportement de l'érosion du sol ou plutôt la fragilité de la surface face à l'agression du fluide en contact, facteur d'initiation du phénomène d'arrachement de l'érosion.

Conclusions générales

Les ouvrages en terre des infrastructures linéaires de transport auxquels nous nous sommes intéressés dans ce travail sont de plus en plus souvent sollicités par des événements climatiques exceptionnels générant une mise en charge du remblai voire une surverse lorsque le niveau des eaux dépasse le remblai, entraînant une rupture progressive causée par un phénomène d'érosion externe ou interne.

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 externe et interne, de dispersion du sol et la relation qui existe entre ces phénomènes. Toutefois l'érosion et la dispersion du sol sont des phénomènes complexes parce que plusieurs paramètres interviennent concomitamment sous l'aspect mécanique et physico-chimique. Nous avons constaté que la vulnérabilité des ouvrages en terre à l'érosion hydrique est extrêmement dépendante de la texture du sol (en particulier, la présence de particules fines argileuses) et de la sensibilité à la dispersion. Ces pathologies montrent l'importance de la nature des matériaux constituant les ouvrages sur le phénomène d'érosion.

Nous avons détaillé les différentes méthodologies d'essai, techniques et méthodes expérimentales sur la caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion. Nous avons constaté la nécessité de trouver une méthode quantitative donnant la contrainte de cisaillement critique à l'interface eau-sol qui constitue la loi d'érosion.

Pour avoir une vision correcte du phénomène dans son ensemble, nous sommes arrivés au constat qu'il était nécessaire d'étudier conjointement l'érosion sous différents aspects, avec des méthodologies d'essais, techniques et méthodes complémentaires en utilisant un même type de sol pour pouvoir comparer les résultats des essais et accéder ainsi à une meilleure connaissance du phénomène (Reiffsteck, 2007).

Afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu et de comparer le phénomène d'érosion et de dispersion, nous avons bâti un programme expérimental comprenant des essais mécaniques et physico-chimiques à différentes échelles. Le choix des outils expérimentaux mis en œuvre dans ce travail est issu des matériels existants du LCPC et des développements envisageables à partir de la recherche bibliographique qui avait permis d'en cerner les domaines de validité. Pour certains essais, nous avons été amenés à proposer des améliorations aux protocoles en vigueur. Un plan d'expériences en découle afin de tester appareils et méthodes sur différentes textures de sols reconstitués de référence au laboratoire et in situ.

Pour ce qui concerne l'érosion externe, nous nous sommes intéressés à la caractérisation de la sensibilité à l'érosion des sols à l'aide de l'Erodimètre à Jets Mobiles, appareil fonctionnant à la fois en laboratoire et sur le terrain. Dans un premier temps, nous avons proposé une adaptation du protocole expérimental et dans un deuxième temps, nous avons validé cette nouvelle approche en laboratoire sur des textures de référence. Ensuite, la première campagne

d'essais nous a permis de valider la faisabilité in situ du nouveau protocole. Enfin, les essais menés dans les deux autres campagnes ont permis tirer les conclusions originales qui peuvent être considérées comme un succès de l'essai avec le nouveau protocole. Ce type d'essai permet ainsi de caractériser de manière simple la sensibilité à l'érosion de différentes textures de sol aussi bien au laboratoire et in situ.

Pour ce qui concerne l'érosion interne, nous nous sommes intéressés à la caractérisation de la sensibilité à l'érosion des sols à l'aide de l'essai d'Erosion de Trou par le dispositif de « Hole Erosion Test », conçu et développé au LCPC. Nous avons établi et validé un modèle d'interprétation utilisant le signal de turbidité et permettant de calculer les quantités caractérisant l'essai (contrainte de cisaillement et taux d'érosion) sans avoir à supposer des lois d'écoulement dans notre échantillon. Notre étude a permis de construire des lois d'érosion pour les mélanges à base de kaolinite et en partie pour les mélanges à base d'illite. Les paramètres tels que contraintes, seuil et taux d'érosion ont alors été estimés pour caractériser la sensibilité à l'érosion des différentes textures. Nous avons constaté que l'essai d'Erosion de Trou n'est pas adapté pour tester des matériaux gonflants à base d'argile montmorillonite. Une approche multi-échelle du trou formé après érosion a finalement permis de lier les observations macroscopiques à la dynamique apparente d'érosion au niveau du trou.

Pour ce qui concerne la dispersion, nous avons mis en œuvre un certain nombre d'essais destinés à caractériser la dispersion de nos sols de référence (Pham *et al.*, 2008a ; 2008b). Les protocoles des normes ASTM testés sur nos textures ont montré que ces derniers n'étaient pas forcément adaptés à ces textures pas assez argileuses pour la plupart. De plus l'approche qualitative de ces essais se prête mal à une étude plus fine des phénomènes de dispersion. Notre nouvel essai d'émiettage (amélioration du « crumb test ») est destiné à répondre à la question de la dispersion pour une plus grande variété de textures et à proposer des valeurs plus quantitatives. Nous avons ainsi montré comment le pourcentage d'argile, la nature de l'argile et le fluide interstitiel intervenaient dans les essais. Cela se révèle particulièrement important eu égard à la variété des situations potentiellement rencontrées sur le terrain : érosion maritime, fluviale ou pluie ; nature des terrains naturels, nature et mode de conception des remblais ou des digues. Nous nous sommes intéressés à l'apport de la zétamétrie pour mesurer l'interaction entre les particules les plus fines dans différents environnements et les relier aux observations faites dans les autres essais (Pham *et al.*, 2007).

Les tendances similaires observées sur les résultats de différents essais d'érosion externe, interne et de dispersion nous permettent d'évaluer le phénomène d'érosion de manière plus globale. Le phénomène de dispersion au sens chimique ou mécanique reflète le comportement de l'érosion du sol. La dispersion comprend le gonflement, la désagrégation, qui mène à la destruction de la structure, tous ces aspects sont des facteurs initiateurs du phénomène d'arrachement ayant lieu lors de l'érosion interne. Nous pouvons ainsi mieux appréhender le phénomène d'érosion à l'aide d'essais géotechniques simples de dispersion.

Perspectives

Notre modèle d'interprétation de la masse érodée basé sur le signal de turbidité dans l'essai Hole Erosion Test donne des paramètres directs de changement de forme du trou préformé dans l'échantillon (qui représente la fissure préexistante dans l'ouvrage). C'est un point crucial lors de la détermination du point de déclenchement et de l'évolution de la dynamique d'érosion autrement dit la loi d'érosion. De plus, notre méthode permet de quantifier l'érosion sans avoir à supposer des lois d'écoulement dans l'échantillon, elle est ainsi une méthode simple dans l'utilisation et l'application pratique. Les résultats issus de notre modèle peuvent fournir des paramètres alimentant le modèle d'apparition de l'érosion dans les remblais d'infrastructures de transport, digues et barrages.

Des améliorations seront à apporter au dispositif de l'Erodimètre à Jets Mobiles, afin de pouvoir extraire des essais *in situ* des paramètres d'érosion généraux, comme la contrainte seuil ou le coefficient d'érosion. Ces améliorations devraient faire de cet essai un outil complet et performant pour la mesure de la sensibilité à l'érosion *in situ*.

Ainsi pourrait être établi un lien avec les paramètres d'érosion déjà obtenus de manière fiable par le « Hole Erosion Test ». Les phénomènes d'érosion externe et interne seraient de ce fait décrits par une loi d'érosion unifiée sous forme une équation universelle d'érodabilité. Le phénomène d'érosion interne d'un type de sol serait estimé de façon plus simple et directe grâce à la réalisation des essais d'érosion externe *in situ*. En se basant sur les paramètres extraits des essais d'érosion externe et interne qui peuvent alimenter les modèles d'apparition de l'érosion, la modélisation réaliste du phénomène d'érosion deviendrait plus accessible.

Présentant la même tendance de comportement que les essais d'érosion, les essais de dispersion ouvrent une possibilité de prédire le phénomène d'érosion d'ouvrage en terre à l'aide d'essais géotechniques simples et non destructifs.

Références bibliographiques

AFNOR (1993), NFP 94-051, Détermination des limites d'Atterberg, *Recueil Normes Géotechniques*, vol. 1, AFNOR, pp. 95-110.

AFNOR (1996), NFP 94-056, Analyse granulométrique : Méthode par tamisage à sec après lavage, *Recueil Normes Géotechniques*, vol. 1, AFNOR, pp. 141-156.

AFNOR (1992), NFP 94-057, Analyse granulométrique : Méthode par sédimentation, *Recueil Normes Géotechniques*, vol. 1, AFNOR, pp. 157-173.

Arulanandan, K., Sargunam, A., Loganathan, P. et Krone, R.B. (1973), Application of chemical and electrical parameters to prediction of erodibility, Soil erosion: Causes and mechanisms; Prevention and control *Highway Research Board, Special Report*, no. 135, pp. 42-51.

Arulanandan, K., Loganathan, P., et Krone, R. B. (1975), Pore and eroding fluid influences on surface erosion on soil, *American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 101, no. 1, pp. 51-66.

Arulanandan, K., Gillogley, E., et Tully, R. (1980), Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils, *Technical Report - US Army Engineer Waterways Experiment Station* no. GL-80-5, p. 99.

Arulanandan, K. et Perry, E. B. (1983), Erosion in relation to filter design criteria in earth dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 109, no. 5, pp. 682-698.

ASTM D 4221 - 99 (1999), Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer, *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.08.

ASTM D 422 - 63 (2002), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.08.

ASTM D 4647 - 93 (1998), Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test, *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.08.

ASTM D 5852 - 95 (1995), Standard Test Method for Erodibility Determination of Soil in the Field or in the Laboratory by the Jet Index Method, *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.09.

ASTM D 6572 - 00 (2000), Standard Test Method for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soil by the Crumb Test, *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.08.

- Atmatzidis D.K. et Ferrin F.R. (1983) Laboratory investigation of soil cutting with a water jet, Second U.S. Water Jet Conference, Rolla, Missouri, pp.121-135
- Bell, F. G., Maud, R. R., et Jermy, C. A. (1994), Dispersive soils in South Africa and earth dams, *A.A. Balkema*, New Delhi, India, p. 1003.
- Bendahmane, F. (2005), Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne, *Thèse de Doctorat*, Université de Nantes, p. 153.
- Benahmed N., Bonelli S. (2007) Étude expérimentale de l'érosion interne d'une kaolinite, *25e rencontres de l'AUGC*, Bordeaux, 4 pages
- Blais, J-P. (2004), Typologie de l'érosion interne et érosion interne des digues fluviales, Une courte revue bibliographique, *Colloque technique sur la sécurité des digues fluviales et de navigation*, Orléans, pp. 65-70.
- Bonelli S., Benahmed N., Brivois O. (2004) On Modelling of the Hole Erosion Test, ICSE Amsterdam,
- Bonelli S., Brivois O., Borghi R., Benahmed N. (2006), On the modelling of piping erosion, *C. R. Mecanique* 334 pp. 555–559
- Bradford, J. M. et Blanchar, R. W. (1999), Mineralogy and water quality parameters in rill erosion of clay-sand mixtures, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 63, no. 5, pp. 1300-1307.
- Briaud, J. L., Ting, C. K., Chen, H. C., Gudavalli, R., Perugu, S., et Wei, G. (1999), Sricos : prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 125, no. 4, pp. 237-246.
- Briaud, J. L., Ting, F. C. K., Chen, H. C., Cao, Y., Han, S. W., et Kwak, K. W. (2001), Erosion function apparatus for scour rate predictions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, no. 2, pp. 105-113.
- Briaud J.-L., Chen H.-C., Li Y., Nurtjahyo P., Wang J. (2003) Complex pier scour and contraction scour in cohesive soils, National Cooperative Highway Research Program Report 24-15, 291 pages
- Burns, B. et Ghataora, G. S. (2007), Internal Erosion of Kaolin, *Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization (GSP 162) Part of Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechnics* A. J. Puppala, N. Hudyma, W. J. Likos, Editors, pp.18–21.
- Chapuis, R. P. (1986a), Quantitative measurement of the scour resistance of natural solid clays, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 23, no. 2, pp. 132-141.
- Chapuis, R. P. (1986b), Use of rotational erosion device on cohesive soils, *Transportation Research Record*, no. 1089, pp. 23-28.

- Chapuis, R. P., Gatien, T. (1986), Improved rotating cylinder technique for quantitative measurements of the scour resistance of clays, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 83-87.
- Christensen, R. W., Das, B.M. (1973), Hydraulic erosion of remoulded cohesive soils, Soil erosion: Causes and mechanisms; Prevention and control *Highway Research Board, Special Report*, no. 135, pp. 8-19.
- Clark, L. A. et Wynn, T. M. (2007), Methods for determining streambank critical shear stress and soil erodibility: Implications for erosion rate predictions, *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no. 1, pp. 95-106.
- Comité Français des Grandes Barrages, (1997), Érosion interne : Typologie, détection et réparation, *Barrage et Réservoirs*, No 6 Spécial congrès CIGB Florence, p. 126.
- Dabbagh A.A., Gonzalez A.S., Pena A.S. (2002) Soil erosion by a continuous water jet, *Soils and Foundation*, Vol 42, No. 5, pp. 1-13
- Decker, R., S., Dunnigan, L., P. (1977) Development and use of the soil conservation service dispersion test, Dispersive clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, *ASTM STP 623*, J.L. Sherard and R. S. Decker, Eds., pp. 94-109.
- Dunn, I.S., (1959). Tractive resistance of cohesive channels. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE 85 (SM 3), pp.1-24.
- Fell, R., Wan, C. F., Cyganiewicz, J., et Foster, M. (2003), Time for development of internal erosion and piping in embankment dams, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 129, no. 4, pp. 307-314.
- Foster, M., Fell, R. et Spannagle, M. (2000), "Statistics of embankment dam failures and accidents", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, no. 5, pp. 1000-1024.
- Foster, M., Fell, R. et Spannagle, M. (2000), Method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, no. 5, pp. 1025-1061.
- Foster, M., Fell, R. (2001), Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, no. 5, pp. 398-407.
- Fry, J-J. (2004), Le Projet National Erosion Interne, *Colloque technique sur la sécurité des digues fluviales et de navigation*, Orléans, pp. 129-146.
- Garbrecht, G. (1984). The "Sadd el Kafara", the world's oldest dam. Special Session on History of Irrigation, *12th ICID Congress*. Colorado State University, USA.

Gavasso E., (2007), Étude de l'érosion sur différentes textures du sol avec Hole Erosion Test et Erodimètre à Jets Mobiles, *Travail de Fin d'Études, Université de Padoue*, p. 32.

Gibbs, H. J. (1962). *A study of erosion and tractive force characteristics in relation to soil mechanics properties*. Soils Engineering Rep. No. EM-643, United States Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Division of Engineering Laboratories, Denver, February 23,.

Grim R. E., (1962), *Clay mineralogy in relation to the Engineering properties of clay materials* Ed. Mc Craw Hill pp. 204-277

Guiton, M., (1998), Ruissellement et risque majeur : Phénomènes, exemples et gestion spatiale des crues, *Etudes et recherches des LPC*, EG 13, p. 315.

Hanson, G. J. (1991), Development of a jet index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways, *Transactions of the ASAE*, vol. 34, no. 5, pp. 2015-2020.

Hanson, G. J. (1992), Erosion resistance of compacted soils, *Transportation Research Record 1369*, pp. 16-30.

Hanson, G. J. (1993) Procédé Soil erodibility testing, Brevet d'invention N°US 5,243,850, 9 pages

Hanson G. J., Robinson K. M., (1993), The influence of soil moisture and compact on spillway erosion, *Transactions of the ASAE*, vol. 36, no5, pp. 1349-1352

Hanson, G. J. Cook, K. R. (1997) Development of excess shear stress parameters for circular jet testing. In: American Society of Agricultural Engineers International Meeting. Minneapolis, Minnesota., August 1997. ASAE Paper no. 972227. 21, St Joseph, Mississippi, USA.

Hanson G. J., Cook K. R. (2004), Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in-situ. *Applied Engineering in Agriculture*, A.S.A.E., Vol. 20 (4), 455-462.

Heinzen, R., T. et Arulanandan, K. (1977), Factors Influencing Dispersive Clays and Methods of Identification, *Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects*, *ASTM Special Technical Publication*, vol. 623, p. 202-217.

Hénensal P. (1983) Recherches qui pourraient être entreprises en génie civil dans le domaine de l'érosion et de l'érodabilité hydrique des sols, *Rapport interne LCPC, FAER 1.04.03.3*, 21 pages

Hénensal P., Millon Devigne P., Duchatel F. (1985) Première étude de faisabilité d'un érodimètre, *Rapport interne LCPC, FAER 1.04.03.5*, 15 pages

Hénensal, P. (1986), L'érosion externe des sols par l'eau : Approche quantitative et mécanismes, *Rapport de recherche LPC*, no. 138, 75 pages

Hénensal P., Millon Devigne P., Duchatel F. (1987) L'érodimètre LCPC, *Rapport interne LCPC, FAER 1.04.03.7*, 21 pages

Hénensal P. (1988) Hauteurs de floculats et précipités dans différents liquides, de sols argileux et d'argiles, variations et essais d'interprétation, *Rapport interne LCPC, FAER 1.04.02.8*, 38 pages

Hénensal, P., Duchatel F. (1990), L'érodimètre à jets mobiles, *Bulletin de liaison Labo. P. et Ch.*, no. 167, pp. 47-52.

Hénensal, P. (1993), Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux : Les protections végétales et structurelles des surfaces et des pentes, *Etudes et recherches des LPC, GT 54*, 111 pages

Hénensal P., Rampon A. (1994) Étude de l'érodabilité des sols fins, Érosion et géotechnique, Rapport interne, CEMAGREF-LCPC, 99 pages

Hjulström F., (1935). Studies on the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries, *Bull. Géol. Inst. Univ. Uppsala* 25, pp. 293-305 et 442-452.

Holmgren G.S., Flanagan C.P., (1977) Factors Affecting Spontaneous Dispersion of Soil Materials as Evidenced by the Crumb Test. *Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects*. ASTM Special Technical Publication, J.L. Sherard and R.S. Drecker Eds., vol 623, pp. 218-239.

Hunter R. J., (1981) Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications, *Colloid Science A series of Monographs*, 386 pages.

Isrelachvili J.N., (1985) Intermolecular and Surface Forces, *Academic Press*.

Julian J.P., Torres R. (2006) Hydraulic erosion of cohesive riverbanks *Geomorphology* 76 193–206

Kamphuis, J.W. and Hall, K.R. (1983), Initiation of Erosion of Consolidated Cohesive Materials by Unidirectional Current, *J. of Hydraulics*, ASCE, Vol 109, pp 49-61.

Kamphuis, J. W., Gaskin, P. N. et Hoogendoorn, E. (1990), Erosion tests on four intact Ontario clays, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, no. 5, pp. 692-696.

Kandiah A., Arulanandan K. (1974) Hydraulic erosion of cohesive soils, *Transport Research Records*, N°497, pp.60-68

LCPC, SETRA, (1980) Fondations de ponts en site aquatique en état précaire, Guide pour la surveillance et le confortement, 167 pages

LCPC, SETRA, (1992) Guide pour les Terrassements Routiers. Vol 1 et 2, 98 pages

- Lefebvre, G., Rohan, K. et Douville, S. (1985), "Erosivity of natural intact structured clay : Evaluation", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 22, no. 4, pp. 508-517.
- Lefebvre, G., Rohan, K. et Milette, J. P. (1986), Erosivity of intact clay : Influence of the natural structure, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 427-434.
- Leonards, G. A., Huang, A. B. et Ramos, J. (1991), Piping and erosion tests at Conner run dam, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, no. 1, pp. 108-117.
- Léonard J. Richard G. (2004) Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength, *Catena* 57 233–249
- Lyle W.M. Smerdon E.T. (1965) Relation of compaction and other properties to resistance of soils. *Trans of the Amer Soc of Agric Engr* 8(3), pp. 419-422
- Machin J. (2000) Recent research on cable jet burial, *Marine Technology Society Journal*, vol. 34,, No 3, pp. 5-10
- Marot, D., Alexis A. et Bendahmane, F. (2007), Specific triaxial device for the study of internal erosion in cohesive soils, *Internal Erosion of Dams and their Foundations – Fell and Fry (eds)*, pp. 159-165.
- Mellor M. (1972) Some general relationship for idealizes jet cutting, *1st int. Symp. On Jet Cutting Technology*, Coventry, pp. A2-25-36
- Mériaux P., Royet P., Folton C. (2004) Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations : guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires, *Cemagref Editions*, p. 191.
- Mitchell, J. K., Soga, K. (2005), *Fundamentals of soil behavior*, 3rd ed., New York, John Wiley and Son, p. 459.
- Moore, W. L., Masch, Jr., F. D. (1962). Experiments on the scour resistance of cohesive sediments. *J. Geophys. Res.*, 67(4), 1437–1449.
- Moriwaki Y., Mitchell J.K. (1977) The role of dispersion in the slaking of intact clay, *Dispersive clays, Related piping and erosion in geotechnical projects*, ASTM Special Technical Publication 623, J.L. Sherard and R.S. Drecker Eds. pp. 287-302
- Partheniades E. (1965) Erosion and deposition of cohesive soils. *J. Hydraulics Division*, HY1, 91:105-137
- Perry, E. B. (1979), Susceptibility of dispersive clay at Grenada dam, Mississippi, to piping and rainfall erosion, *Final Report, U.S. Army Engineer*, p. 111.

- Pham, T. L., Maloula A., Duc, M., Reiffsteck, P., Chevalier, C. et Guedon, S. (2007), Dispersion par un fluide de la fraction fine argileuse continue dans les milieux poreux que sont les sols, *Milieux poreux et transferts hydriques*, Bulletin du Groupe Francophone Humidimetrie et traNsferTs en milieux poreux, no. 53, pp. 23-28.
- Pham, T. L., Duc, M., Chevalier, C., Reiffsteck, P. et Guedon, S. (2008a), Développement d'un nouvel essai caractérisant la dispersion des sols, *Proceedings Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, JNNG 08*, pp. 603-610.
- Pham, T. L., Chevalier, Duc, M., C., Reiffsteck, P. et Guedon, S., (2008b), Development of a new test to characterize dispersion of soil, *Soumis à Fourth International Conference on Scour and Erosion, Tokyo*, p. 6.
- Pitre, L., (2008), Contribution à l'évaluation de l'érodabilité interne des sols, Rapport du stage du *Travail de Fin d'Etudes*, École Nationale des Travaux Publics de l'État, p. 65.
- Raudkivi, A. J. et Tan, S. K. (1984), Erosion of cohesive soils, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 22, no. 4, pp. 217-233.
- Reddi, L. N. et Bonala, M. V. S. (1997), Critical shear stress and its relationship with cohesion for sand-kaolinite mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 34, no. 1, pp. 26-33.
- Reddi, L. N., Lee, I. M. et Bonala, M. V. S. (2000), Comparison of Internal and Surface Erosion Using Flow Pump Tests on a Sand-Kaolinite Mixture, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 116-122.
- Reiffsteck, P., Pham, T. L., Vargas R. et Paihua S. (2006), Comparative study of superficial and internal erosion test, *Proceedings Third International Conference on Scour and Erosion, Amsterdam* , pp. 209-210.
- Reiffsteck Ph., Nguyen Pham P.T. Arbaut, J. (2007) Influence de la répartition granulométrique sur le comportement mécanique d'un sol, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 268-269, pp.83-104
- Reiffsteck, P. (2007), Evaluation of erosion of soil used in dykes and earth embankments which are subjected to flood, *Internal Erosion of Dams and their Foundations - Fell and Fry (eds)*, pp. 191-202.
- REMR (1985) Water jet erodibility measurement device, *Technical note GT-SE-1,2*, 2 pages
- Riddick T.M., (1968) *Control of Colloid Stability through Zeta Potential*, Livingston Publishing Company, Wynnewood, Pennsylvania, 372 pages.
- Rockwell P.K. (1981) Water jet trenching in submerged clays, *First U.S. Water Jet Conference*, Golden, Colorado. pp. 195-206

Rousseva S., Torri, D. Pagliai, M. (2002) Effect of rain on the macroporosity at the soil surface, *European Journal of Soil Science*, 53, pp.83-94

Royet P. (2005), Internal erosion problems encountered on dams and dikes in France (historical cases), *Workshop on Internal Erosion*, Aussois , 25-27 april 2005.

Samb F., (2006), Interaction eau-sol pour l'évaluation de l'érodabilité interne des sols, *Rapport du stage du Master de Recherche*, ENPC, p. 36.

Sanchez R.L., Strutynsky A.I., Silver M.L.. (1983) Evaluation of the erosion potential of embankment core materials using laboratory triaxial erosion test procedure, Tech Rep. GL-80-5 , *U.S. Army Engineers, Waterways Experiment station, Vicksburg, MS EU*, 51 pages

Schnitter N. J. (1994) *A History of Dams, the Useful Pyramids*. A.A. Balkema: Rotterdam,

Shaikh, A., Ruff, J. F., Charlie, W. A. et Abt, S. R. (1988a), Erosion rate of dispersive and non dispersive clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 114, no. 5, pp. 589-600.

Shaikh, A., Ruff, J. F. et Abt, S. R. (1988b), Erosion rate of compacted Na-Montmorillonite soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 114, no. 3, pp. 296-305.

Shields, A. (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau*, Heft 26 : 5-24, traduit en anglais par Ott W.P. et van Uchelen J.C. : Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement, dans *Hydrodynamics Laboratory Publication No. 167*, Hydrodynamics Lab., California Institute of Technology, Pasadena

Sherard, J. L., Decker, R. S. et Ryker, N. L. (1972) Piping in earth dams of dispersive clay, *Proceedings of ASCE Specialty conference on the performance of earth and earth supported structures*, Purdue University, West Lafayette IN, pp. 589-626.

Sherard, J. L., Decker, R. S. et Ryker, N. L. (1972) Hydraulic fracturing in low dams of dispersive clay, *Proceedings of ASCE Specialty conference on the performance of earth and earth supported structures*, pp. 653-689.

Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. et Decker, R. S. (1976a) Identification and nature of dispersive soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 102, no. 4, pp. 187-301.

Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S. et Steele, E. F. (1976b), Pinhole Test for identifying dispersive soils, *American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 102, no. 1, pp. 69-85.

Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. et Decker, R. S. (1977) Some engineering problems with dispersive clays, *Dispersive clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects*, *ASTM STP 623*, J.L. Sherard and R. S. Decker, Eds., pp. 3-12.

Skempton, A. W. et Brogan, J. M. (1994), Experiments on piping in sandy gravels, *Geotechnique*, vol. 44, no. 3, pp. 449-460.

Smerdon, E. T., and R. P. Beasley. (1961). Critical tractive forces in cohesive soils. *Agric. Eng.* 26-29.

Soudain M. (2004) *Come rains, come shine, Geotechnics of transports*, Ground engineering pp.14-15

Sundaram T.L., Liu H.L. (1978) On the equivalence between stationary and non-stationary modes of operation of water jets, *4st Int. Symp. On jet cutting technology*, Canterbury, pp. F2-17-30.

Tarog, I. (2000), Perméabilité et érosion interne des mélanges sable-argile, contribution théorique et expérimentale, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Lyon, p. 297.

Van Olphen, H. (1963), *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, 2nd ed, New York, John Wiley and Son, p. 301.

Vargas, R. (2005), Effets de l'érosion sur la stabilité des massifs des sols, Rapport du stage du *Master de Recherche*, École Nationale des Ponts et Chaussées, p. 19.

Verwey, E. J. W., Overbeek, J. Th. G. (1948), *Theory of the Stability of Lyophobic Colloids*, Elsevier, Amsterdam, 108 pages

Vinci L. de (1510) Le codex Leicester, *L'art de la science, catalogue de l'exposition du musée du Luxembourg*, Paris, 1997, 173 pages et un CD Rom

Viollet P.-L. (2000) L'hydraulique dans les civilisations anciennes, 5000 ans d'histoire, Presses de l'ENPC, 374 pages

Wan, C. F. et Fell, R. (2002), Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test, *UNICIV Report*, no. R-412, pp. 3-1~8-5.

Wan, C. F. et Fell, R. (2004), Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, no. 4, pp. 373-380

Warloulzel K. (1999) Caractérisation et comportement des géotextiles pour la lutte contre l'érosion pluviale des sols : étude des mécanismes de protection et compatibilité avec la végétation, *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier Grenoble I, 210 pages

Wischmeier, W. H., Winterkorn, H. F., Christensen, R. W., Das, B., Meyer, L. D., Akky, M. R., Shen, C. K., Arulanandan, K., Sargunam, A., Loganathan, P., Krone, R. B. et Paaswell, R. E. (1973), Soil erosion: Causes and mechanisms; Prevention and control, *Highway Research Board, Special Report* no. 135, p. 145.

SABLE FONTAINEBLEAU NE34**Fournisseur :** société SIFRACO**Analyse chimique et physique :**

Composition chimique (fournis par le fabricant)	Fraction
SiO ₂	100 %
TiO ₂	-
Al ₂ O ₃	-
Fe ₂ O ₃	-
MgO	-
CaO	-
Na ₂ O	-
K ₂ O	-

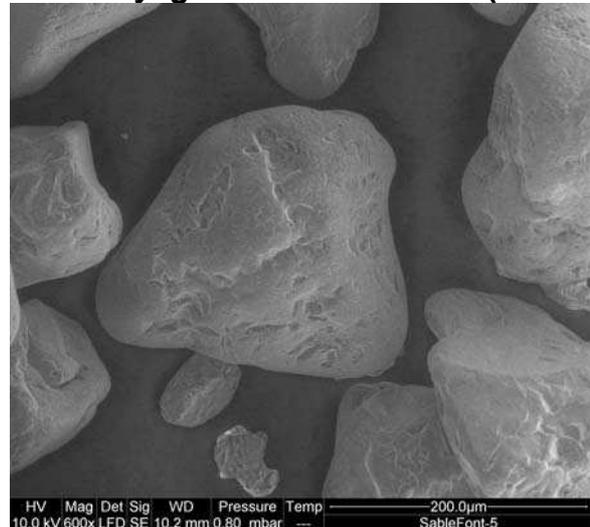
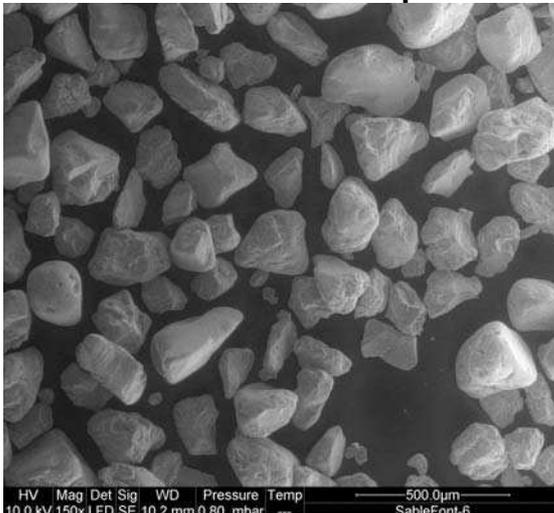
Caractéristiques physiques (fournis par le fabricant)	
pH	7
Surface spécifique	0,0155 m ² /g
Masse volumique	2,65 g/cm ³
Coefficient d'angularité	1,2

Analyse granulométrique :

- Les grains sont très fins, blancs et non anguleux (voir les images du MEB).
- La courbe granulométrique est déterminée par la méthode de tamisage selon la norme française NF P 94-056



Taille du tamis (µm)	Passant au tamis (%)
315	99
200	60
100	4
80	3

Observations avec le Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE)

LIMON CER ROUEN A28

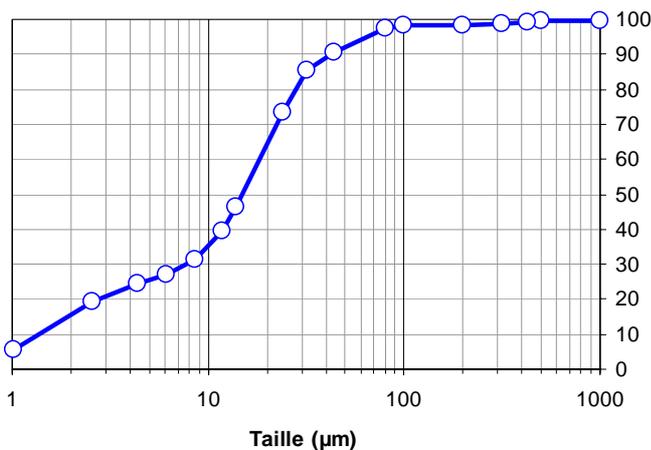
Fournisseur : prélèvement sur site
Analyse chimique et physique :

Composition chimique (analyse par EDX au LCPC)	Fraction
SiO ₂	55 %
TiO ₂	2 %
Al ₂ O ₃	18 %
Fe ₂ O ₃	10 %
CaO	-
MgO	2 %
K ₂ O	9 %
Na ₂ O	2 %

Caractéristiques physiques types	
Teneur en eau	12 %
Masse volumique	2,7 g/cm ³
Limite de liquidité	32 %
Indice de plasticité	13 %
Capacité d'échange cationique	nd

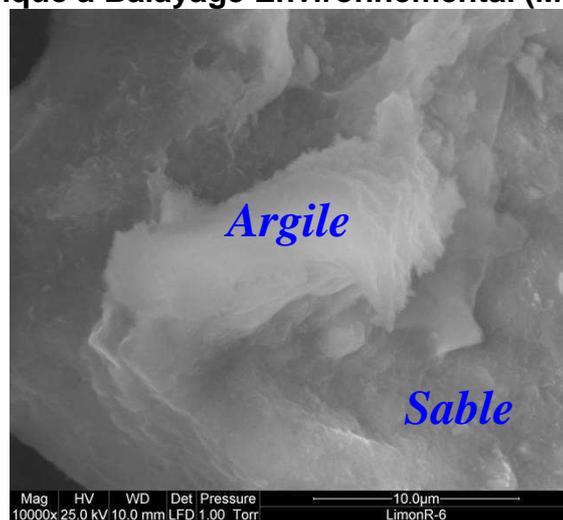
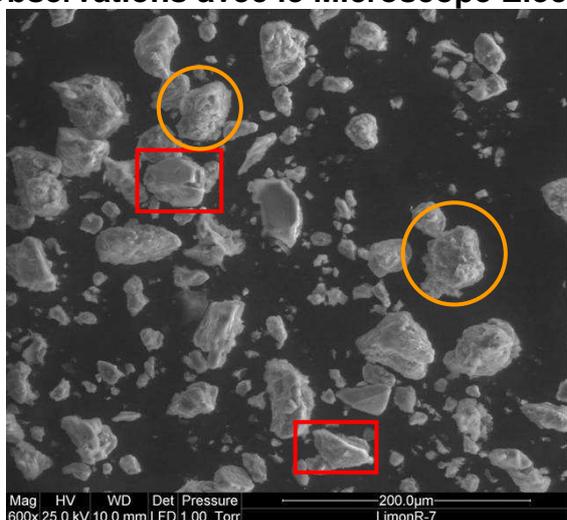
Analyse granulométrique :

- Le matériau est essentiellement composé de quartz (symbole rectangle sur l'image du MEB) avec un peu de feldspaths. La partie argileuse (symbole circulaire) est relativement faible, contient essentiellement une illite-muscovite et de la montmorillonite avec peut être des traces de kaolinite.
- Les analyses granulométriques ont été faites par la méthode de tamisage et sédimentation selon la norme française NF P 94-056 et NF P 94-057.



Taille du tamis (µm)	Passant au tamis (%)	Taille du tamis (µm)	Passant au tamis (%)
80	97	9	31
44	91	6	27
32	85	4	24
24	73	3	19
14	46	1	6
12	39		

Observations avec le Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE)



KAOLINITE ARMORICAINE

Fournisseur : société KAOLINIÈRE ARMORICAINE

Analyse chimique et physique :

Composition chimique (fournis par le fabricant)	Fraction
SiO ₂	48 %
TiO ₂	-
Al ₂ O ₃	36 %
Fe ₂ O ₃	tr
CaO	-
MgO	-
K ₂ O	2 %
Na ₂ O	-
Perte au feu	13 %

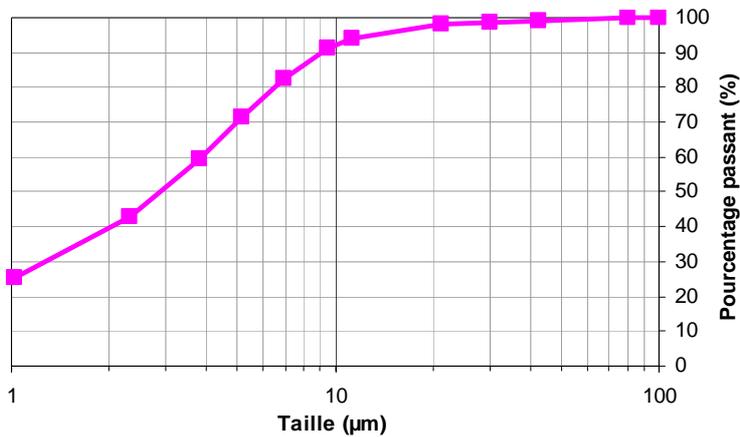
Caractéristiques physiques types (fournis par le fabricant)	
pH	6
Surface spécifique	9 m ² /g
Masse volumique	2,6 g/cm ³
Capacité d'échange cationique	nd

Analyse

granulométrique :

- Ce kaolin est essentiellement composé de kaolinite (83,6% estimé par ATG), d'un peu d'illite-muscovite et une très faible teneur de quartz.

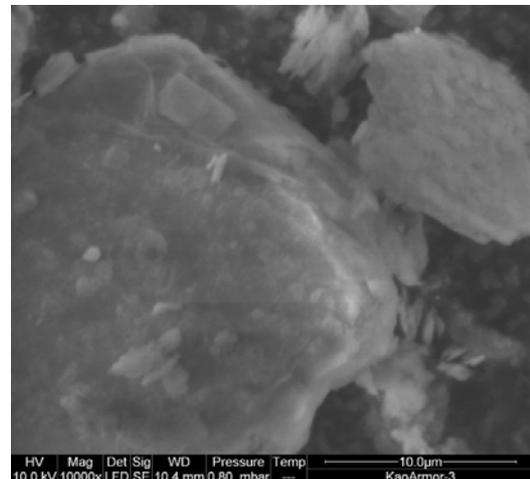
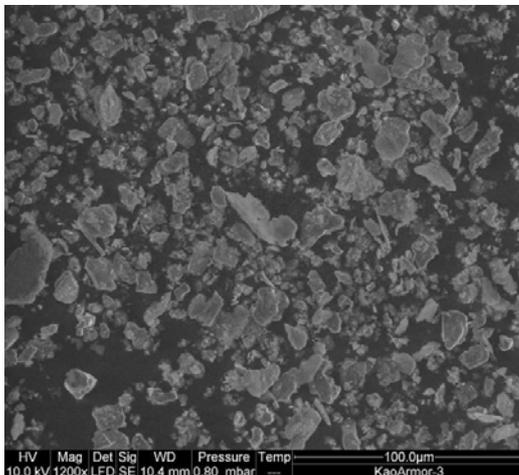
- Les analyses granulométriques est faits par la méthode de sédimentation selon la norme française NF P 94-057.



Taille du tamis (µm)	Passant au tamis (%)
42	99
21	98
11	94
7	83
5	71
4	60
2	43
1	25

Observations avec le Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE)

:



ILLITE ARVEL

Fournisseur : groupe Socodis

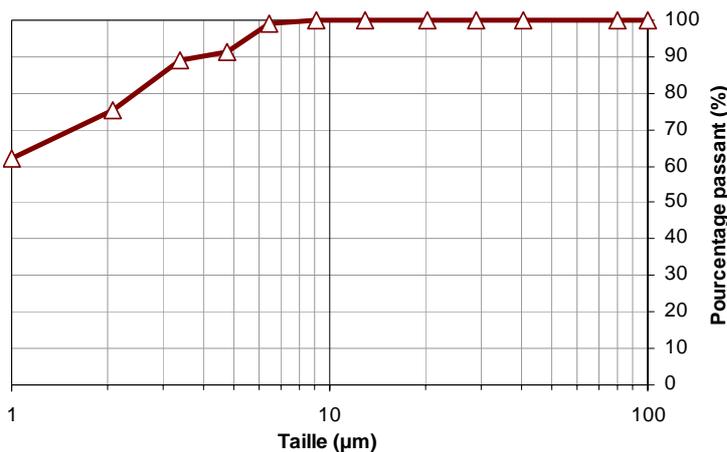
Analyse chimique et physique :

Composition chimique (fournis par le fabricant)	Fraction
SiO ₂	46 %
TiO ₂	1 %
Al ₂ O ₃	21 %
Fe ₂ O ₃	7 %
CaO	5 %
MgO	3 %
K ₂ O	6 %
Na ₂ O	-
Perte au feu	11 %

Caractéristiques physiques types (fournis par le fabricant)	
pH	7-8
Surface spécifique	110 m ² /g
Capacité d'échange cationique)	30 meq/100g
Masse volumique	nd

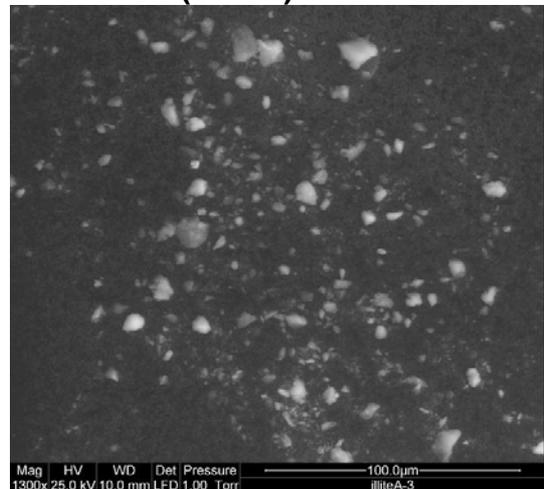
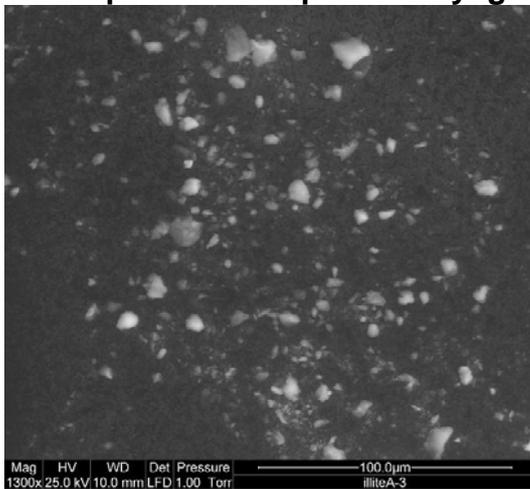
Analyse granulométrique :

- L'illite d'Arvel est majoritairement composée d'illite-muscovite et des traces de kaolinite.
- Les analyses granulométriques sont faits par la méthode de sédimentation selon la norme française NF P 94-057.



Taille du tamis (µm)	Passant au tamis (%)
9	100
6	99
5	91
3	89
2	75
1	62

Observations avec le Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE) :



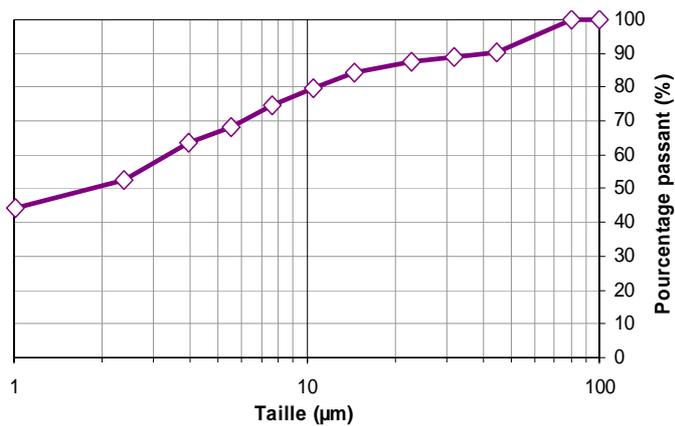
MONTMORILLONITE ARVEL**Fournisseur :** groupe Socodis**Analyse chimique et physique :**

Composition chimique (fournis par le fabricant)	Fraction
SiO ₂	57 %
TiO ₂	-
Al ₂ O ₃	18 %
Fe ₂ O ₃	4 %
CaO	3 %
MgO	6 %
K ₂ O	1 %
Na ₂ O	-
Perte au feu	11 %

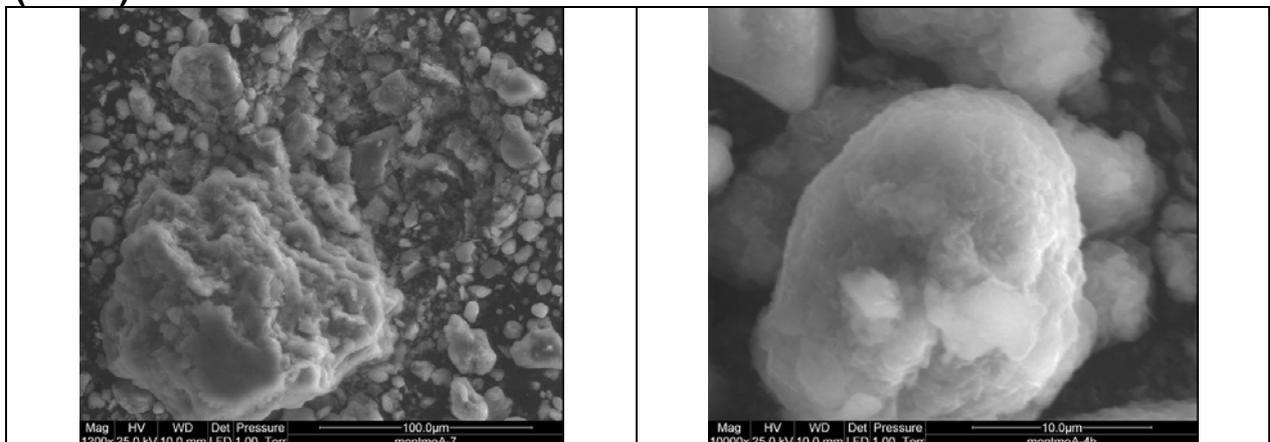
Caractéristiques physiques types (fournis par le fabricant)	
pH	7-8
Surface spécifique	250-400 m ² /g
Capacité d'échange cationique	70 meq/100g
Masse volumique	nd

Analyse granulométrique :

- La montmorillonite d'Arvel présente des traces de palygorskite.
- Les analyses granulométriques sont faits par la méthode de sédimentation selon la norme française NF P 94-057.



Taille du tamis (µm)	Passant au tamis (%)
23	88
15	85
11	80
8	75
6	68
4	63
2	52
1	44

Observations avec le Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE) :

SOL DU REMLAI A MONTOIRE

Fournisseur : prélèvement sur site

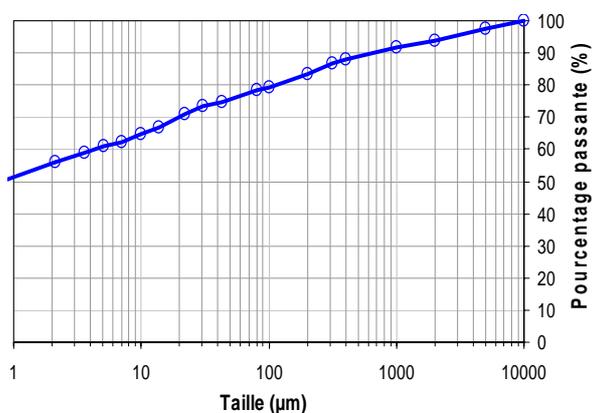
Analyse chimique et physique :

Caractéristiques mécaniques (réalisé au LCPC)	
Masse volumique	1,6 g/cm ³
Teneur en eau	20 %
Limite de liquidité W _L	44 %
Limite de plasticité W _p	23 %
Indice de plasticité I _p	21 %
Classification USCS/LCPC	CL/A _p (argile peu plastique)
Sable	22%
Limon	25%
Argile	53%

Composant minéralogique dans l'argile (analysé au LCPC)	
Kaolinite	25%
Montmorillonite	70%
Interstratifié	5%

Analyse granulométrique :

Les analyses granulométriques ont été faites par la méthode de tamisage et sédimentation selon la norme française NF P 94-056 et NF P 94-057.



Taille du tamis (µm)	Passant au tamis (%)	Taille du tamis (µm)	Passant au tamis (%)
10000	100	30	74
2000	94	14	67
400	88	7	62
200	83	3	59
80	78	1	51

Annexe B : Protocole expérimental de l'Erodimètre à Jets Mobiles (EJM) du LCPC

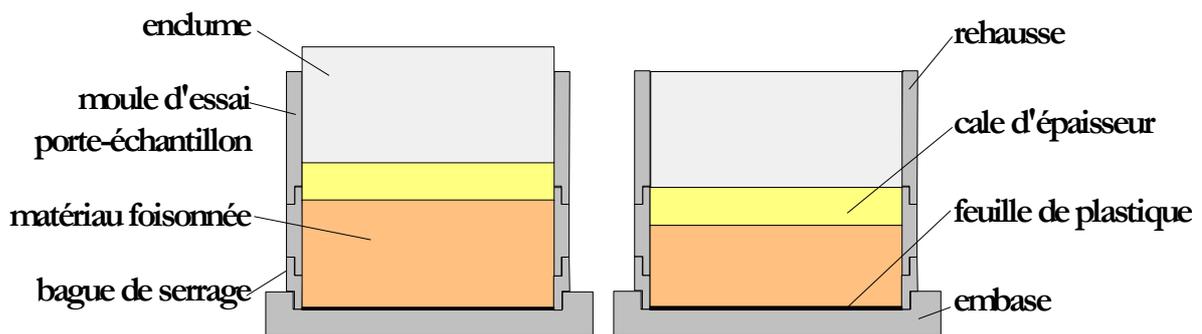
1. Essai en laboratoire

a. Préparation de l'échantillon

- L'éprouvette a les dimensions suivantes : diamètre $D = 152 \text{ mm}$; hauteur $L = 39 \text{ mm}$; volume $V = 708 \text{ cm}^3$,
- L'échantillon est un mélange composé du sable, de l'argile (et du limon),
- La quantité sèche de chaque composant est pesée et puis ils sont mélangés,
- L'eau est ajoutée progressivement jusqu'à la teneur en eau calculée. (On fixe la teneur en eau pour toutes les textures 95% celle de Optimum Proctor Normal),
- La texture du sol est mélangée jusqu'au moment où le mélange est assez homogène,
- Le sol est ensuite conservé dans un sac hermétique pour éviter l'évaporation de l'eau et il est laissé pendant 24 heures pour la maturation de l'argile.

b. Compactage de l'échantillon

- L'échantillon est compacté en une couche,
- La quantité de sol est calculée ; après avoir mis cette quantité dans le moule, le sol est compacté directement dans le moule d'essai en acier,
- S'assurer que tout le matériel employé (moules d'essai porte-échantillon, bague de serrage, embase, disque d'interposition et outils divers) est propre et sec,
- Disposer un disque de plastique de 0,2 mm d'épaisseur sur l'embase,
- Fixer la bague de serrage sur le moule d'essai porte-échantillon et serrer jusqu'au maintien,
- Poser le tout sur l'embase,
- Mettre la rehausse et verser la quantité de matériau humide (mélange humide à éroder) que l'on désire compacter,
- Egaliser la hauteur de matériau,
- Mettre la cale d'épaisseur sur le matériau et mettre l'enclume sur la cale d'épaisseur,
- Placer l'ensemble sous la presse et dans l'axe du piston (regarder pour cela dans deux directions perpendiculaires),
- Compacter jusqu'à ce que le piston vienne au contact de la partie supérieure de la rehausse comme le montre la photo droite de la figure.



AVANT COMPRESSION APRES COMPRESSION

Figure B1 : Schéma de compactage de l'échantillon

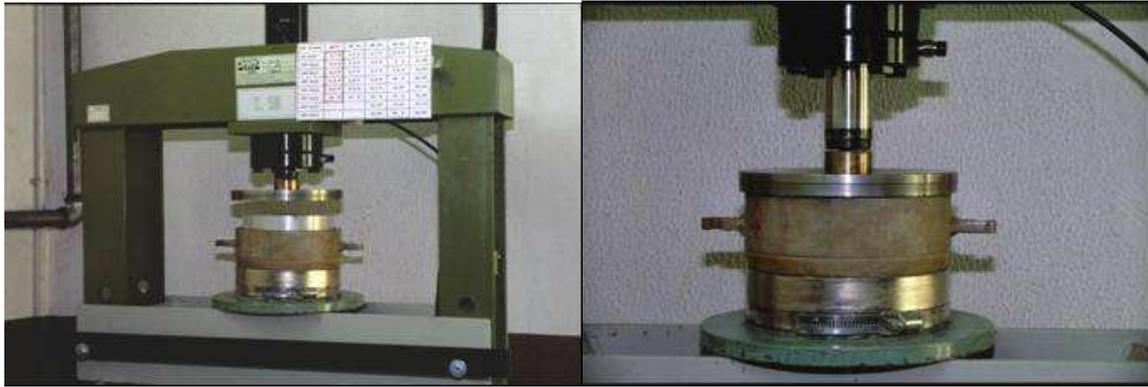


Figure B.2 : Photo de compactage de l'échantillon

2. Essais in situ

- préparer la surface à tester : nettoyer si besoin, raser selon la pente désirée,
- creuser un logement pour le récipient de récupération des effluents,
- positionner la trousse coupante de telle façon que le bécuet, soit dirigé dans le sens de la plus grande pente
- enfoncer la trousse coupante dans le sol, pour éviter les pertes latérales du ruissellement jusqu'à ce que la génératrice inférieure du bécuet soit au niveau de la surface du sol,
- placer l'érodeur sur la trousse coupante (figure B.3) et préparer les différents organes à l'érodeur comme indiqué au point 3,
- relier le flacon d'essai d'une part à la pompe à vide, d'autre part au bécuet par le tuyau d'aspiration.
- déclencher l'essai.

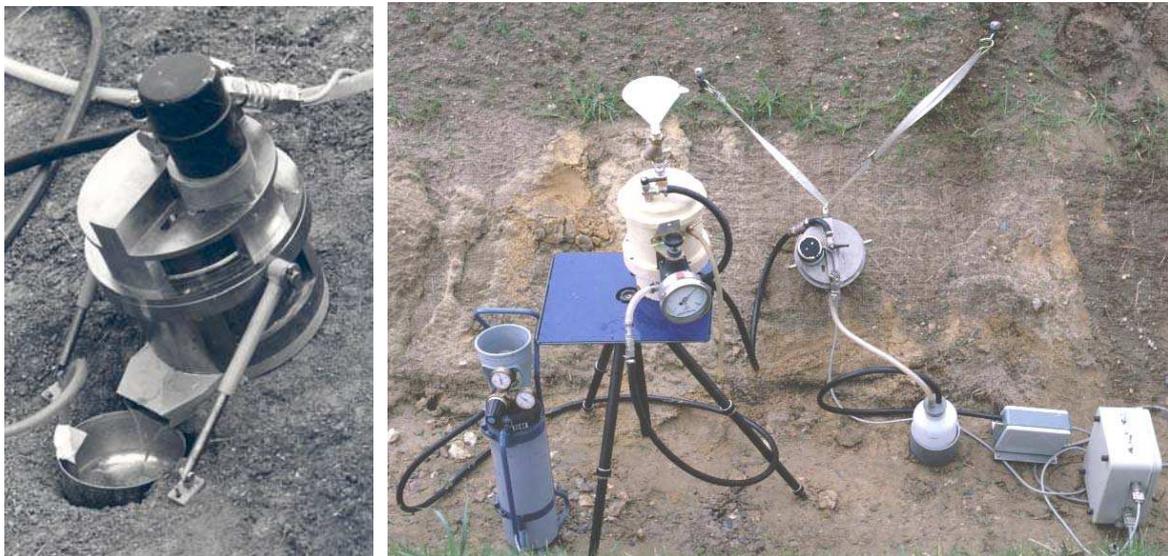


Figure B.3 : Erodeur installé sur une pente d'un fossé autoroutier, ensemble du matériel d'essai

3. Déclenchement de l'essai

a. Mise en fonction de l'érodeur

Au départ, le réservoir d'eau de l'appareillage est vide. Les branchements avec la source de gaz sous pression (air comprimé ou bouteille d'azote liquéfié) ou avec l'érodeur ne sont pas effectués. Avant l'essai, les gicleurs sont vérifiés pour s'assurer qu'ils ne sont pas bouchés.

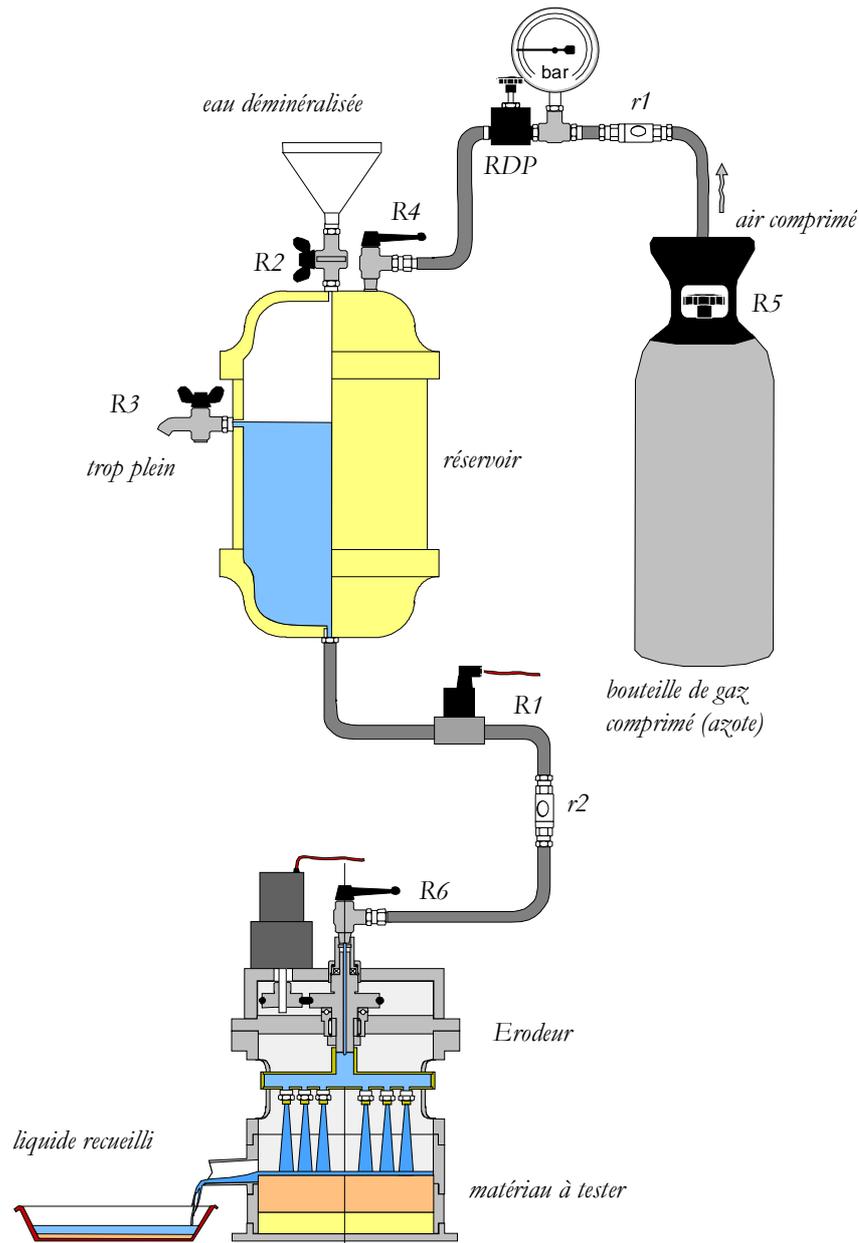


Figure B.4 : Schéma de l'appareillage Erodimètre à Jets Mobiles du LCPC

La figure B.4, montre schématiquement la position de différents organes de contrôle de l'appareillage : robinets R1, R2, R3, R4, R5 et R6, régulateur de pression (noté RDP sur la figure), raccords rapides r1 et r2.

b. Remplissage du réservoir

Le robinet R1 de sortie du réservoir est initialement bien fermé. Le robinet de remplissage R2 et le robinet de jauge R3 sont ouverts. Le réservoir est rempli d'eau distillée, par l'entonnoir du robinet R2, jusqu'à ce que l'eau s'écoule par le robinet de jauge R3. Les robinets R2 et R3 sont alors fermés.

c. Mise en pression du réservoir

Le robinet du réservoir R4 de l'arrivée de l'air sous pression reste fermé. La source d'arrivée du gaz sous pression est branchée à l'aide du raccord rapide r1. Le robinet R5 de la source de gaz sous pression est ouvert. Avec l'aide du régulateur de pression RDP, la pression désirée est réglée (à 0,2 bar). Le robinet R4 du réservoir est ouvert. Le réservoir est alors sous pression.

d. Branchement de l'érodeur

Le raccord rapide r2 relie le réservoir et l'érodeur. L'érodeur est reliée à la source électrique. Le moteur est mis en marche. Le robinet R1 est ouvert. La pluie érosive se manifestera dès l'ouverture du robinet d'arrêt R6.

4. Déclenchement et suivi de l'essai

- Réglage de la pression appliquée à 0,2 bar.
- Ouverture du robinet R6 et démarrage l'essai : déclenchement du chronomètre.
- Recueil des effluents de l'essai sont recueillis à 1, 2, 4, 8 et 12 minutes.
- mesure de la profondeur de la rainure est mesurée aux mêmes instants.

Note : Comme le volume du réservoir est limité à 2 litres, il faut alimenter de l'eau distillée entre la 4e et 8e minute, entre la 8e et 12e minute.

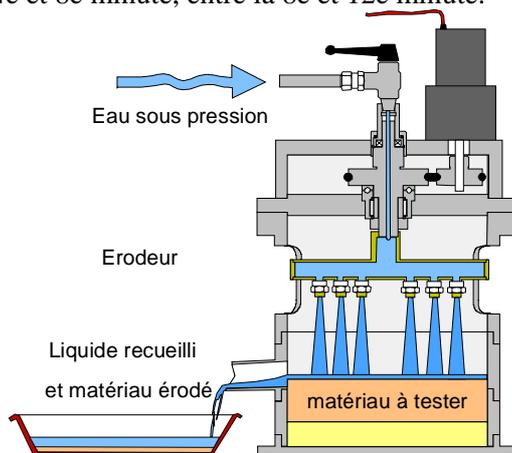


Figure B.5 : Exemple d'un essai en cours

5. Fin de l'essai

- Après la 12e minute, la valve R6 de l'érodeur est fermée. Le moteur de rotation de l'érodeur est arrêté. Les valves R5, R4 et R1 sont fermés. L'essai est terminé.
- Les effluents recueillis à chaque moment sont mis dans l'étuve pour être séchés (Figure B.6).
- Déterminer, par pesée, la masse sèche du matériau recueilli à chaque prélèvement.



Figure B.6: Séchage des effluents dans l'étuve

6. Démontage et nettoyage du dispositif

- Débrancher l'électricité de l'appareillage,
- Nettoyer la chambre de pluie,
- Nettoyer et vérifier les buses pour s'assurer qu'elles n'étaient pas bouchées.

Annexe C : Protocole expérimental et matériel de Hole Erosion Test du LCPC

1. Description du matériel

- **Préparation de l'échantillon de sol à tester**

Préparation de la texture de sol type

- Un bac non altérable
- Une tare de grand volume
- Une balance (type BERKEL, graduation par 1g, de 20g à 5 kg)
- Une truelle
- Une éprouvette de 500 ml

Préparation de l'échantillon de sol

- Une tare de petit volume
- Un moule cylindrique en plexiglas (D=71mm L=130mm)
- Une embase
- Un rehausseur
- Un pilon (D=70mm L=150mm) pesant 1,611 kg
- Une balance (type BERKEL, graduation par 1g, de 20g à 5 kg)
- Un couteau



Moule et embase

- **Exécution de l'essai**

Matériel d'acquisition des données

- Un turbidimètre (de type ATI – Analytical technology)
- Deux capteurs de pression (de type KERT Mod.K AT 5VD)
- Un débitmètre (de type TICO 735 – HENGSTLER)
- Une centrale d'acquisition de données (de type Spider 8 HBM 4.8 kHz/DC)
- Le logiciel d'acquisition de données : Lab View
- Un thermomètre
- Un bloc de paraffine de densité d

Dispositif général du HET

Le dispositif général du Hole Erosion Test est composé des éléments suivants :

Le réservoir d'eau :

- Une colonne d'eau, munie de deux vannes d'arrivée et de sortie d'eau (E1 et E2) ainsi que d'une vanne d'arrivée d'air (A5). Elle est également munie de témoins (en tubes plastiques) pour indiquer le niveau d'eau et la pression d'air dans le réservoir, ainsi qu'une valve échappatoire d'air (A6).
- Une arrivée d'eau courante.
- Un manomètre



Manomètre, HET, LCPC

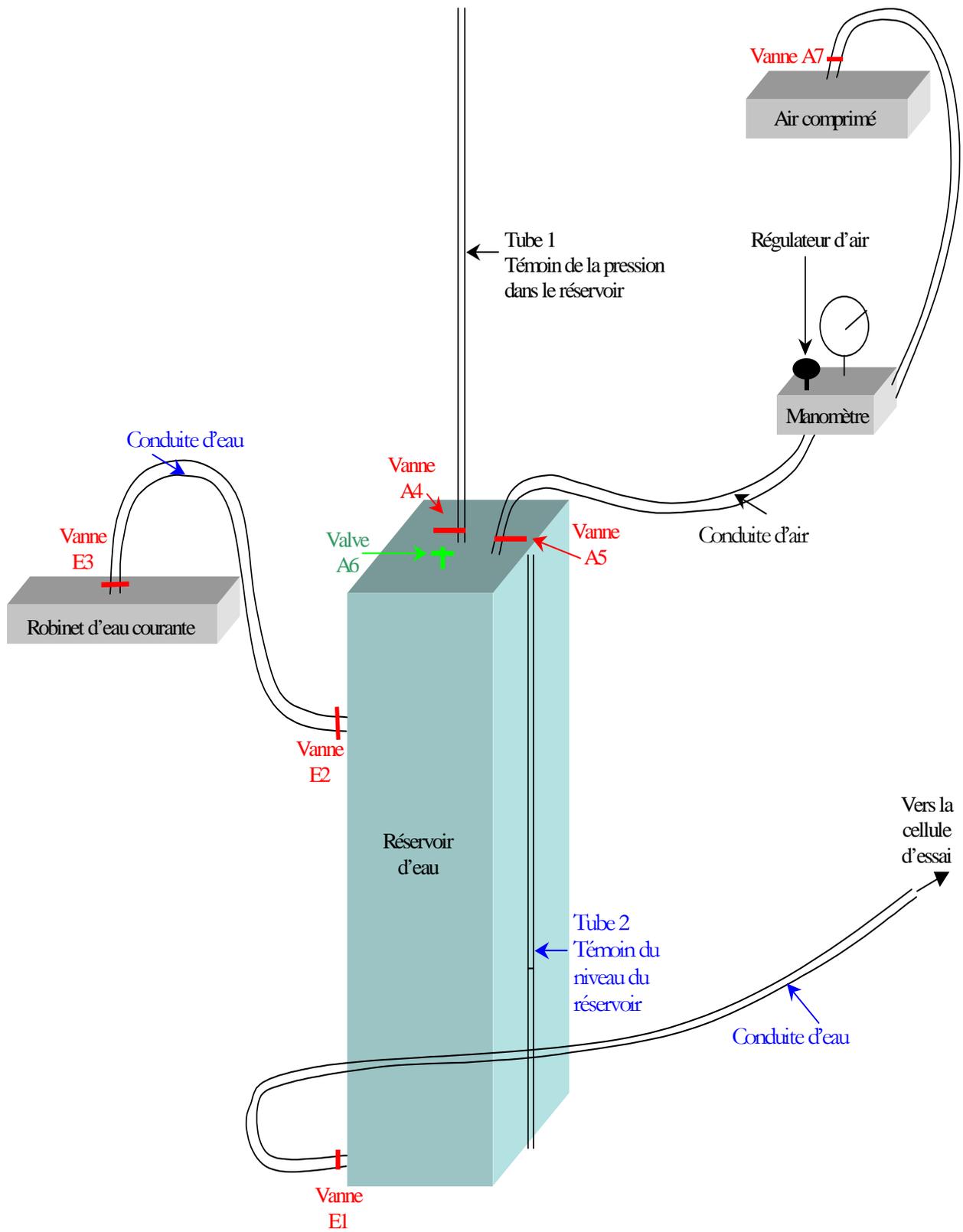
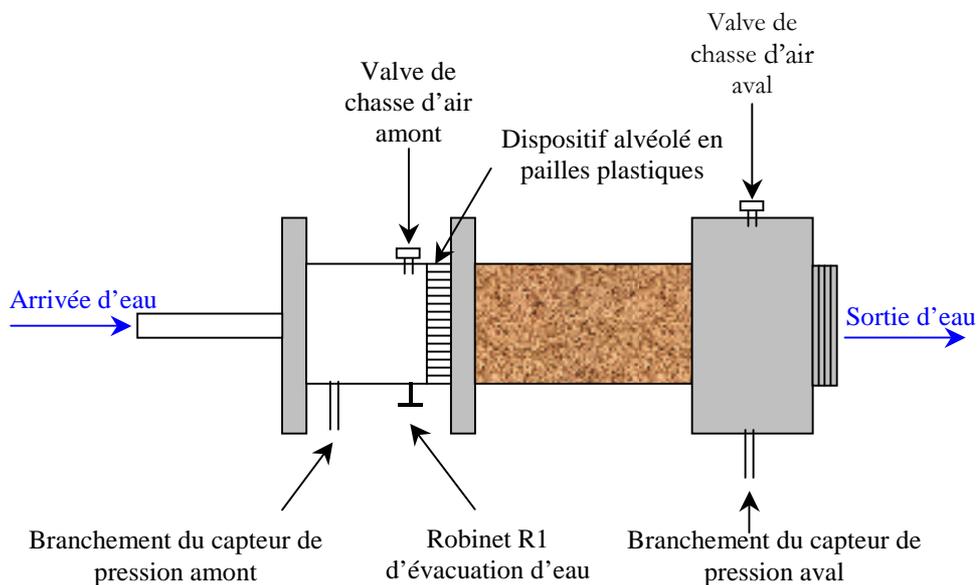


Figure C.1 Schéma détaillé du réservoir d'eau et de ses connexions, HET, LCPC

La cellule d'essai : Elle se compose de quatre parties :

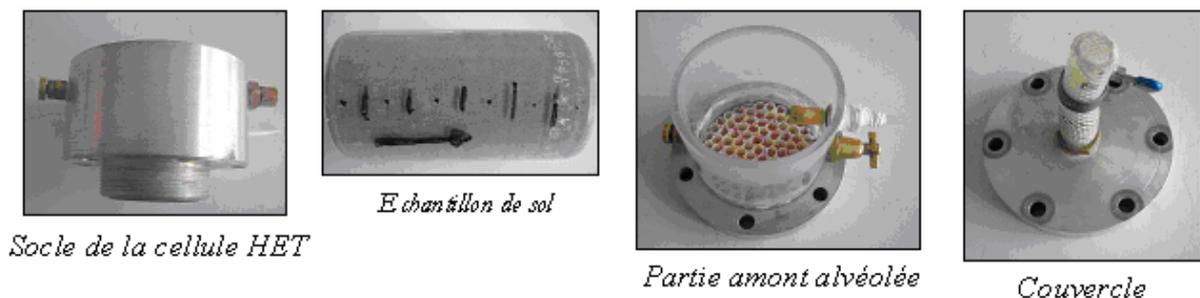
- Le socle de la cellule d'essai correspond à sa partie aval et est directement connecté au tube d'évacuation des effluents. Le socle est muni d'une valve de chasse d'air (avale) ainsi que d'un abri pour brancher le capteur de pression à l'aval de la cellule.
- L'éprouvette est constituée du moule en plexiglas contenant l'échantillon de sol à éroder.
- La partie amont de la cellule est constituée d'un moule en plexiglas transparent dans lequel a été rajouté un dispositif diffuseur en pailles plastiques du commerce. Ce dispositif est placé à l'entrée de l'éprouvette pour favoriser un écoulement laminaire. Cette partie amont est également munie d'une valve de chasse d'air (amont) et d'un abri pour brancher le capteur d'air amont.
- Le couvercle de la cellule d'essai permet quant à lui le raccordement de celle-ci avec le réservoir d'eau.

Ces quatre parties de cellule sont maintenues entre elles grâce à des vis sans fin boulonnées aux deux extrémités.



- 1 Socle de la cellule d'essai
- 2 Échantillon de sol
- 3 Partie amont alvéolée de la cellule d'essai
- 4 Couvercle de la cellule d'essai

Figure C.2 Schéma détaillé de la cellule d'essai, HET, LCPC



Le dispositif aval d'évacuation des effluents :

L'aval de la cellule est connecté directement au dispositif d'évacuation des effluents. Celui-ci est constitué de tubes en PVC et sont disposés comme suit :

Noter la présence du turbidimètre directement à l'aval de la cellule d'essai.

Les effluents s'écoulent au travers d'un tamis de 50 μ m.

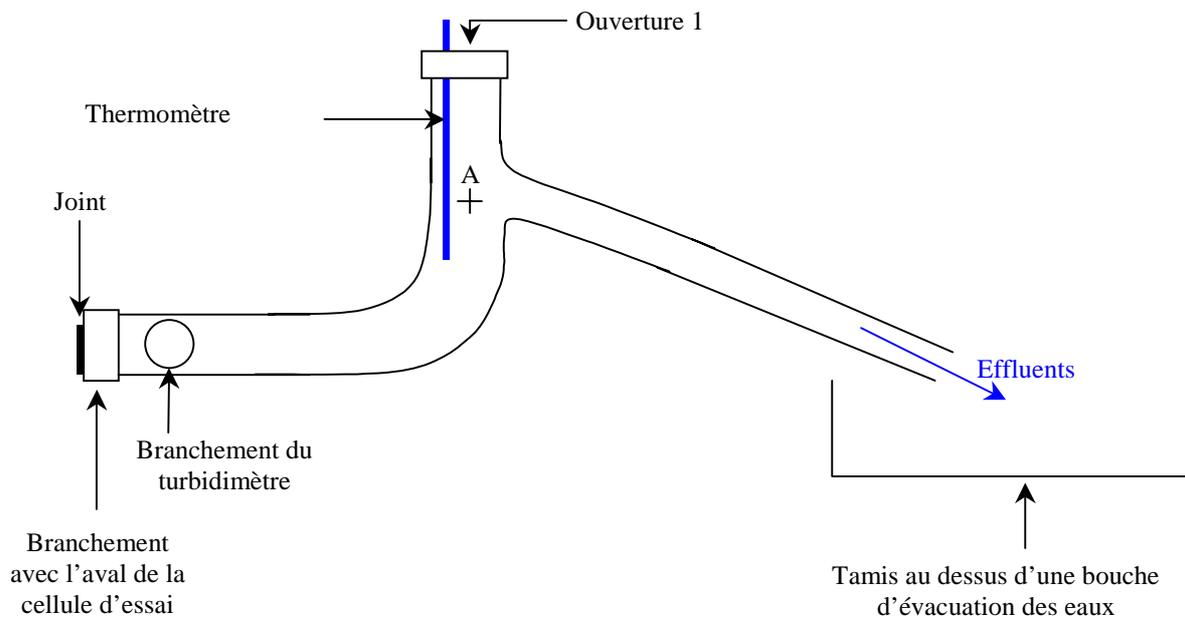


Figure C.3 Schéma détaillé du dispositif aval de la cellule d'essai, HET, LCPC

2. Protocole expérimental détaillé

• Préparation de la texture de sol

Détermination de la quantité de chaque composant à mélanger :

Soit une texture de type x/y à préparer. On note y le pourcentage (en masse) d'argile du commerce et x le pourcentage (en masse) de sable du commerce à mettre dans la préparation.

On note également y_A et x_A les pourcentages respectifs d'argile et de sable qui composent l'argile du commerce ainsi que y_S et x_S ceux composant le sable du commerce, au cas où ces derniers ne sont pas purs.

Le sol doit être préparé de façon à obtenir au minimum une densité sèche égale à 95% de l'optimum Proctor normal de cette texture x/y.

L'éprouvette utilisée ($D = 71\text{mm}$, $L = 130\text{mm}$) a un volume V égal à $514,7\text{ cm}^3$.

Les différentes quantités à prélever (sable, argile et eau) sont données par les formules suivantes :

$$M_S = (x \cdot x_S + y \cdot x_A) M_T$$

$$M_A = (x \cdot y_S + y \cdot y_A) M_T$$

$$M_E = w_{OPN} \cdot M_T$$

Avec $M_T =$ masse totale de l'échantillon = $(0,95V\rho_{OPN})+20$

Préparation de la texture :

Les quantités sèches d'argile et de sable sont pesées puis mélangées à la truelle dans un bac non altérable.

L'eau est ensuite ajoutée puis mélangée jusqu'à ce que la préparation devienne homogène.

Celle-ci est ensuite conservée dans un sac plastique hermétique (on évite ainsi l'évaporation de l'eau) au minimum 24 h pour attendre la maturation de l'argile pour les textures sablo argileuse. Il faut attendre au minimum 48 h pour les textures 100% argileuse.

• Préparation de l'éprouvette

Une fois les 24 h de maturation de l'argile écoulées, la mise en place du matériau dans le moule se fait en $n=6$ couches.

La quantité de sol préparé à prélever pour chaque couche est la suivante :

$$M_{\text{couche}} = [(M_T - 20) \cdot (1 + w_{OPN})] / n$$

Le protocole de mise en oeuvre est le suivant :

- Poser le moule en vertical dans l'embase et serrer les vis de façon à maintenir le moule pendant le compactage des couches.
- Introduire dans le moule en plexiglas la masse relative à la première couche.
- Compacteur cette première couche à l'aide du pilon de diamètre 70mm (40 à 50 coups de pilon).
- Gratter à l'aide d'un couteau la surface de la couche afin d'assurer une bonne cohésion avec la couche suivante.



Mise en place des couches de l'échantillon

- Recommencer les points 2, 3 et 4 pour les 5 autres couches (utiliser une rehausse pour compacter les couches supérieures de l'échantillon).
- Une fois le compactage des 6 couches effectuées, retirer le moule de l'embase et enlever le surplus de matériau aux bords de l'éprouvette à l'aide du couteau.
- Peser la masse de l'échantillon et noter le résultat dans le procès verbal de l'essai.

Le trou au milieu de l'échantillon est ensuite effectué à l'aide d'une perceuse verticale, et d'un foret de 3 mm. Le perçage de l'échantillon doit se faire lentement et sans accoups pour obtenir une surface de trou la plus régulière possible :

- Percer tout d'abord l'échantillon jusqu'au tiers.
- Relever le foret et éteindre la perceuse.
- Nettoyer le foret pour enlever le sol susceptible de modifier le compactage de l'échantillon.
- Recommencer l'opération jusqu'au 2/3, puis jusqu'au bout de l'échantillon.
- Peser l'échantillon une fois le trou percé et noter le résultat dans le procès verbal d'essai.

- **Préparation de l'essai**

Mise en place de la cellule d'essai :

- Poser le socle de la cellule côté vis.
- Ajouter par dessus la grille « grand tamis ».
- Introduire l'éprouvette de sol préparée précédemment.
- Ajouter sur le haut de l'éprouvette la grille « petit tamis ».
- Ajouter la partie amont de la cellule en respectant l'alignement des pointillés.
- Ajouter le couvercle de la cellule en respectant l'alignement des pointillés.
- Introduire les six vis sans fin aux endroits prévus à cet effet puis les fixer à l'aide des boulons en vissant symétriquement (de la même manière que pour l'essai triaxial).

Branchements de la cellule avec le dispositif général :

- S'assurer que le tube d'arrivée d'eau entre le réservoir et la cellule d'essai ne contient pas de bulles d'air.
- S'assurer que toutes les vannes du réservoir d'eau sont fermées, excepté la vanne A5, qui reste ouverte tout au long de l'essai.
- Mouiller le joint prévu pour la connexion avale de la cellule et le poser à son emplacement (Voir *Schéma détaillé du dispositif aval de la cellule d'essai, HET, LCPC*).
- Poser la cellule sur le support prévu dans le dispositif général de façon à avoir les valves de chasse d'air en haut, et les abris des capteurs en bas.
- Visser la connexion avale de la cellule d'essai.
- Effectuer la connexion amont en introduisant le tube d'arrivée d'eau du couvercle de la cellule dans le robinet et en étanchant la connexion à l'aide d'un collier.

Remplissage du réservoir :

- S'assurer que la vanne E1 est fermée.
- Ouvrir la vanne A4.
- Ouvrir la vanne E2 et la valve A6.
- Ouvrir le robinet d'eau (vanne E3).
- Laisser remplir le réservoir jusqu'à ce que le témoin (tube 2) indique qu'il est plein.
- Fermer le robinet d'eau (vanne E3), la vanne E2 et la valve A6.

Branchement des appareils de mesure :

- Brancher successivement l'alimentation du turbidimètre, du débitmètre, des capteurs de pression et de la centrale d'acquisition.
- Régler le mode du turbidimètre sur : MODE 0.0mA / 00

Introduction de l'air sous pression :

- S'assurer que les vannes E1 et E2, ainsi que la valve A6 sont fermées.
- S'assurer que les vannes A4 et A5 sont ouvertes.
- S'assurer que le régulateur d'air du manomètre est dévissé.
- Ouvrir le robinet d'air comprimé.
- Visser lentement le régulateur d'air du manomètre, jusqu'à ce que l'eau monte dans le tube 1 témoin. Stabiliser la hauteur d'eau à l'altitude de la partie supérieure de la cellule d'essai.

Enregistrement des données préliminaires au déclenchement de l'essai :

- Créer deux documents texte : l'un sous le nom de « Z_ArgxSabyPz(w) » et l'autre sous le nom de « ArgxSabyPz(w) », avec x et y les pourcentages d'argile et de sable dans la texture, z la pression à laquelle sera effectué l'essai, et w le numéro de l'essai.
- Ouvrir le logiciel LabView de National Instruments et exécuter le logiciel sous le document « Z_ArgxSabyPz(w) ».

Mise en eau de la cellule d'essai :

- S'assurer que les deux valves de chasse d'air amont et aval de la cellule d'essai sont ouvertes.
- S'assurer que le robinet situé sous la partie amont de la cellule d'essai est fermé.
- Ouvrir à moitié la vanne E1 : l'eau s'écoule lentement dans la partie amont de la cellule.
- Remplir d'eau le côté aval de la cellule d'essai, si possible à la même vitesse d'écoulement que pour l'amont, en introduisant l'eau à l'aide d'un récipient au niveau de l'ouverture 1 du dispositif aval.
- Cesser de remplir l'aval de la cellule lorsque l'eau commence à couler de la valve de chasse d'air aval. Fermer alors la valve de chasse d'air aval.
- Lorsque l'eau commence à couler au niveau de la valve de chasse d'air amont, fermer la valve de chasse d'air amont, et fermer la vanne E1.
- Brancher les capteurs de pression aval et amont en s'assurant qu'il ne reste pas de bulles d'air dans les abris.
- A l'aide du régulateur d'air du manomètre, augmenter la pression d'air dans le réservoir, jusqu'à ce que l'eau dans le tube témoin 1 soit à l'altitude du point A du dispositif aval.
- Remplir de nouveau d'eau l'aval de la cellule d'essai à partir de l'ouverture 1, jusqu'à ce qu'il y ait écoulement d'effluents.
- Etalonner les valeurs de pression amont et aval sur le logiciel LabView de façon à obtenir un delta de pression nul.

• **Déclenchement de l'essai**

- Arrêter l'exécution de LabView sur le fichier « Z_ArgxSabyPz(w) ».
- Exécuter LabView sur le fichier « ArgxSabyPz(w) ».
- Fermer la vanne A4.
- Ouvrir complètement la vanne E1.
- Visser progressivement le régulateur d'air du manomètre jusqu'à lecture (sur Lab View) de la différence de pression z attendue entre l'amont et l'aval.

• **Suivi de l'essai**

- Régler constamment la différence de pression entre l'amont et l'aval de manière à compenser la perte de charge au cours du temps (la différence de pression doit rester constante au cours de l'essai).
- Vérifier de temps à autre que la valeur du débit indiquée sur le débitmètre est bien celle indiquée dans le logiciel LabView de National Instruments.

- **Arrêt de l'essai**

- Lorsque la perte de charge est trop importante et que l'on arrive pas à maintenir la différence de pression constante, il faut diminuer la pression hydraulique en dévissant progressivement le régulateur d'air du manomètre.
- Lorsque la différence de pression est suffisamment faible (entre 5 et 10 bars), ouvrir la vanne A4.
- Attendre que l'eau soit descendue dans le tube 1 témoin pour fermer la vanne E1.
- Couper l'arrivée d'air comprimé.
- Arrêter l'exécution du logiciel Lab View.
- Noter la température de l'eau dans le procès verbal de l'essai

- **Démontage du dispositif**

Mise à sec de la cellule d'essai :

- Débrancher l'alimentation du turbidimètre, débitmètre, capteurs de pression et centrale d'acquisition.
- Faire chauffer un bloc de paraffine.
- Ouvrir les valves de chasse d'air amont et aval et attendre que l'eau ait terminé de s'écouler.
- Dévisser la connexion entre l'aval de la cellule d'essai et le dispositif aval. Ouvrir le robinet R1. Attendre que l'eau ait fini de s'écouler.
- Dévisser le collier assurant la liaison entre la cellule d'essai et l'arrivée d'eau depuis le réservoir.
- Enlever la cellule d'essai du dispositif général et la démanteler.

Emprunte du trou érodé :

- Récupérer l'échantillon de sol dont le trou initial a été érodé et le peser. Noter le résultat dans le procès verbal de l'essai.
- Verser la paraffine liquide dans le trou de l'échantillon. Peser l'échantillon et noter le résultat dans le procès verbal.
- Une fois la paraffine solidifiée, casser l'échantillon et récupérer la paraffine solide. La peser, et noter le résultat dans le procès verbal de l'essai.

Nettoyage du dispositif :

- Nettoyer à l'eau du robinet les différents composants de la cellule d'essai.
- Nettoyer à l'eau du robinet le dispositif aval du HET, afin d'enlever les matériaux qui peuvent s'être accumulés à l'aval de la cellule d'essai, et qui pourraient fausser les mesures du turbidimètre lors des prochains essais.

Annexe D : Symboles

Notation	Unité	Dénomination
α	[m ³ /kg]	Coefficient de proportionnalité entre la turbidité et la concentration de l'effluent
C	[kg/m ³]	Concentration de particules de sol dans le fluide
D_i	[m]	Diamètre à l'instant i du trou
D_f	[m]	Diamètre final du trou
D_o	[m]	Diamètre initial du trou
$\dot{\epsilon}$	[kg/s/m ²]	Taux d'érosion
ρ	[kg/m ³]	Masse volumique du sol
ρ_d	[kg/m ³]	Masse volumique sec du sol
ρ_w	[kg/m ³]	Masse volumique de l'eau
f	[kN/m ² .s]	Coefficient de frottement
G	[m/s ²]	Accélération de pesanteur
k_{er}	[s/m]	Coefficient d'érosion
L	[m]	Longueur de l'échantillon
M	[kg]	Masse érodée de sol
M_f	[kg]	Masse érodée finale de sol
M_{para}	[kg]	Masse du moulage en paraffine
OPN		Optimum Proctor Normal
ΔP	[m]	Différence de pression entre l'amont et l'aval
Q	[m ³ /s]	Débit de l'écoulement
Re		Nombre de Reynolds
R_o	[m]	Rayon initial du trou
R_t	[m]	Rayon à l'instant t du trou
τ	[Pa]	Contrainte de cisaillement
τ_c	[Pa]	Contrainte de cisaillement critique
T	ppm	Turbidité de l'effluent
t	[s]	Temps
ν	[m ² /s]	Viscosité cinématique du fluide
v	[m/s]	Vitesse de l'écoulement
V_{para}	[m ³]	Volume du moulage en paraffine
V	[m ³]	Volume

Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide

Les ouvrages en terre des infrastructures linéaires de transport peuvent être sollicités par des événements climatiques exceptionnels générant une élévation du niveau des eaux. Le passage d'une crue s'accompagne normalement d'érosions latérales dues au courant affectant en premier lieu les talus des remblais. Nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux conséquences de la mise en charge des remblais voire de la surverse lorsque le niveau des eaux dépasse les remblais, entraînant une rupture progressive causée par un phénomène d'érosion externe ou interne.

Le présent travail étudie la caractérisation des processus du phénomène d'érosion et de dispersion des sols argileux. Premièrement, l'érosion du sol a été étudiée par le dispositif d'Erodimètre à Jets Mobiles (EJM) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Ce type d'essai permet de caractériser de manière simple la sensibilité à l'érosion de différentes textures de sol aussi bien au laboratoire que sur le terrain. Deuxièmement, cette étude a été poursuivie par des essais d'érosion de trou à l'aide d'un dispositif de « Hole Erosion Test » (HET), conçu et développé au LCPC. Pour différentes textures de sol, l'évolution du taux d'érosion en fonction de la contrainte de cisaillement à l'interface sol-fluide est évaluée et l'érosion interne est caractérisée à l'aide d'une loi d'érosion semi-empirique. Cette étude expérimentale a été complétée par des observations de la surface du sol avant et après érosion avec un Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE). Troisièmement, la dispersion du sol a été étudiée par le nouvel essai d'émiettage (« Crumb Test » amélioré). L'amélioration de l'essai normalisé par l'ASTM aux résultats principalement qualitatifs nous a permis d'accéder à des mesures quantitatives. Les mesures du potentiel zêta avec la zétamètre sont des apports complémentaires dans la description de la dispersion. Finalement, la comparaison des différents essais d'érosion et de dispersion a été abordée, les tendances similaires observées nous permettent d'évaluer le phénomène d'érosion de manière globale.

Mots clés : Erosion, dispersion du sol, contrainte de cisaillement critique, loi d'érosion, érodimètre à jets, essai de trou, essai d'émiettage.

Erosion and dispersion of clayed soils by a fluid

The embankment component of linear infrastructure of transport can be submitted to exceptional climatic events generating a rise in water level. The passage of a flood is normally the cause of lateral erosion due to current affecting primarily the slope of embankments. We focus here especially on the consequences of the hydraulic load imposed on the embankment and also the overflow when the water level is beyond the crest, causing a gradual rupture induced by superficial or internal erosion.

This study presents the characterization of the erosion and the dispersion of clayed soils. Firstly, the soil erosion has been studied by the Jet erosion test of LCPC. This type of test is used to characterize the susceptibility to erosion of different soil textures in both the laboratory and the field. Secondly, the study of the erosion phenomenon was conducted with the Hole Erosion Test, designed and developed at LCPC. For a variety of soil textures, the rate of erosion and critical shear stress at the soil-fluid interface is evaluated by using a semi-empirical erosion law. This experimental study was supplemented by observations of the surface before and after erosion with an environmental scanning electron microscopy. Thirdly, the dispersion of soil has been studied by the crumb test. Improving the ASTM standard test in which the results are mainly qualitative allows us access to quantitative measurements. The zeta potential taken with zetameter is a complementary measure in the description of the dispersion. Finally, the comparison of different tests of erosion and dispersion was discussed, similar trends observed allow us to understand the erosion in a global comprehension.

Keywords: Erosion, dispersion, critical shear stress, erosion law, pinhole test, jets erosion test, hole erosion test, crumb test.