

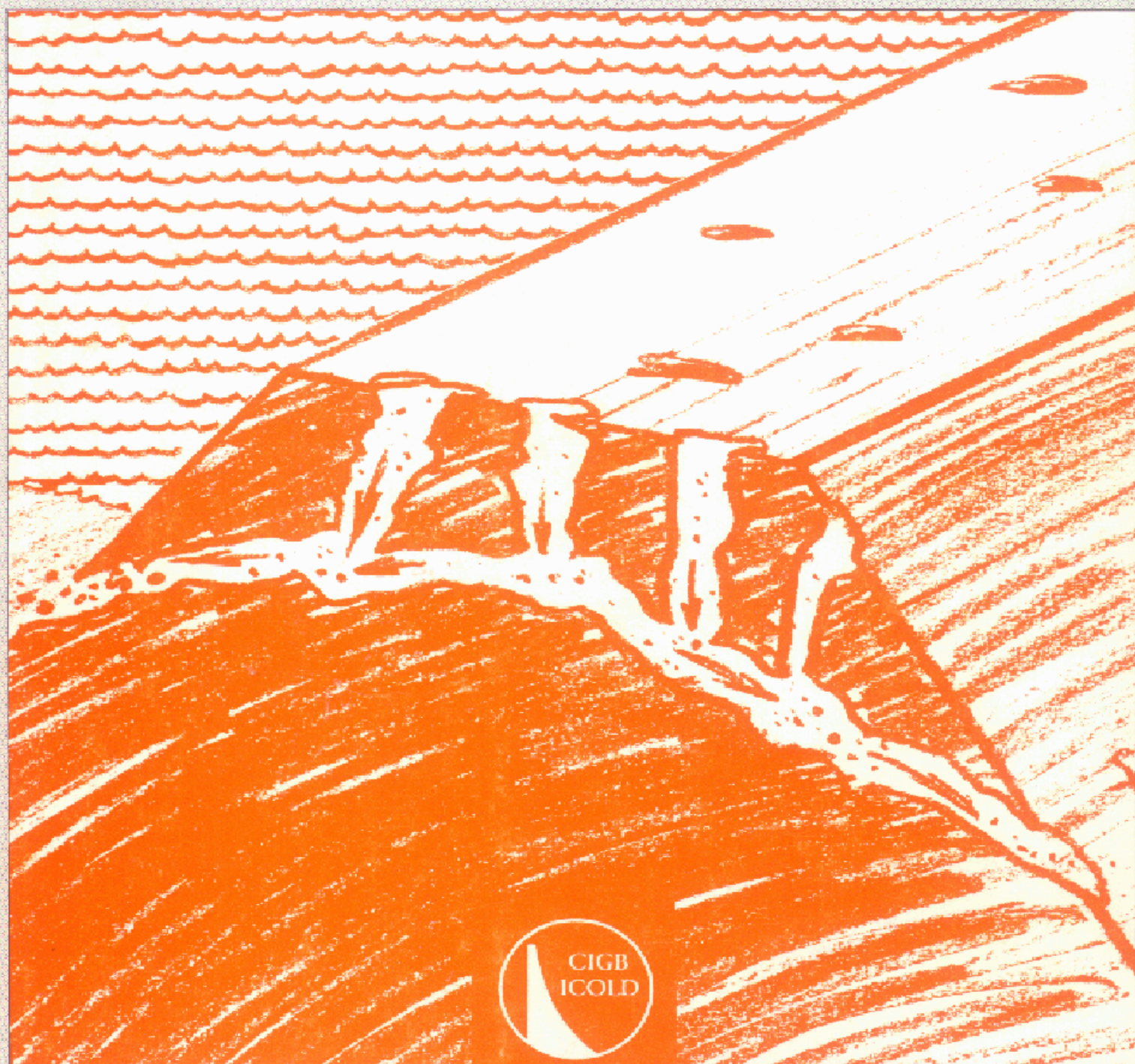
DISPERSIVE SOILS IN EMBANKMENT DAMS.

Review.

SOLS DISPERSIFS DANS LES BARRAGES EN REMBLAI.

Aperçu général.

Bulletin 77



1990

This Bulletin has been prepared for the Committee on Materials for Fill Dams
by USCOLD under the guidance of L. O. Timblin, Jr.,
with the assistance from C. Sudhindra (India).

*Ce Bulletin a été préparé pour le Comité des Matériaux pour Barrages en Remblai
par USCOLD sous la direction de L. O. Timblin,
avec la collaboration de C. Sudhindra (Inde).*

DISPERSIVE SOILS IN EMBANKMENT DAMS.

Review.

SOLS DISPERSIFS DANS LES BARRAGES EN REMBLAI.

Aperçu général.

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 40 42 67 33 - Télex : 641320 ICOLD F - Fax : (33-1) 40 42 60 71

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

Les informations, analyses et conclusions auxquelles cet ouvrage renvoie sont sous la seule responsabilité de leur(s) auteur(s) respectif(s) cité(s).

Les informations, analyses et conclusions contenues dans cet ouvrage n'ont pas force de Loi et ne doivent pas être considérées comme un substitut aux réglementations officielles imposées par la Loi. Elles sont uniquement destinées à un public de Professionnels Avertis, seuls aptes à en apprécier et à en déterminer la valeur et la portée et à en appliquer avec précision les recommandations à chaque cas particulier.

Malgré tout le soin apporté à la rédaction de cet ouvrage, compte tenu de l'évolution des techniques et de la science, nous ne pouvons en garantir l'exhaustivité.

Nous déclinons expressément toute responsabilité quant à l'interprétation et l'application éventuelles (y compris les dommages éventuels en résultant ou liés) du contenu de cet ouvrage.

En poursuivant la lecture de cet ouvrage, vous acceptez de façon expresse cette condition.

NOTICE – DISCLAIMER :

The information, analyses and conclusions referred to herein are the sole responsibility of the author(s) thereof.

The information, analyses and conclusions in this document have no legal force and must not be considered as substituting for legally-enforceable official regulations. They are intended for the use of experienced professionals who are alone equipped to judge their pertinence and applicability and to apply accurately the recommendations to any particular case.

This document has been drafted with the greatest care but, in view of the pace of change in science and technology, we cannot guarantee that it covers all aspects of the topics discussed.

We decline all responsibility whatsoever for how the information herein is interpreted and used and will accept no liability for any loss or damage arising therefrom.

Do not read on unless you accept this disclaimer without reservation.

COMMITTEE ON MATERIALS FOR FILL DAMS
COMITÉ DES MATÉRIAUX POUR BARRAGES EN REMBLAI (*)
(1983-1989)

Chairman/Président	
France	J. N. PLICHON (1)
Canada	G. S. LAROCQUE (2)
Members/Membres	
Australia/Australie	P. MACKENZIE
Austria/Autriche	P. TSCHERNUTTER
Colombia/Colombie	A. MARULANDA
Finland/Finlande	A. LESKELA
France	R. CORDA
German Dem. Rep/RDA	Dr. REHFELD
Germany (FRG)/Allemagne (RFA)	H. STEFFEN
Great Britain/Grande-Bretagne	J. A. CHARLES
India/Inde	C. SUDHINDRA
Italy/Italie	R. JAPPELLI
Netherlands/Pays-Bas	J. WOESTENENK
New Zealand/Nlle-Zélande	M. D. GILLON
Portugal	F. A. GUEDES DE MELLO
South Africa/Afrique du Sud	H. F. ELGES
USA/États-Unis	D. E. BOWES
USSR/URSS	V. G. RADCHENKO

(*) Composition en juillet 1989
Membership in July 1989

(1) Chairman/Président (1983-1989)

(2) Chairman since 1989/Président depuis 1989

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. CONSÉQUENCES SUR LA
TECHNIQUE DES BARRAGES
EN REMBLAI
3. IDENTIFICATION DES ARGILLES
DISPERSIVES
4. CONSIDÉRATIONS RELATIVES
AUX ÉTUDES ET A LA
CONSTRUCTION
5. RÉSUMÉ
6. RÉFÉRENCES

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. ENGINEERING CONSEQUENCES
FOR FILL DAMS
3. IDENTIFICATION OF DISPERSIVE
CLAYS
4. ENGINEERING CONSIDERATIONS
5. SUMMARY
6. REFERENCES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	7
1. INTRODUCTION	8
2. CONSÉQUENCES SUR LA TECHNIQUE DES BARRAGES EN REMBLAI	14
2.1. Mécanisme des ruptures par renard	14
2.2. Érosion des sols dispersifs par la pluie	14
2.3. Expérience requise sur des sols argileux dispersifs	18
3. IDENTIFICATION DES ARGILES DISPERSIVES	22
3.1. Essais d'identification <i>in situ</i>	22
3.2. Essais en laboratoire	22
3.2.1. « Crumb test » (essai sur une « miette »)	24
3.2.2. Essai SCS au double hydromètre	26
3.2.3. « Pinhole test » (essai du « trou d'épingle »)	26
3.2.4. Essais chimiques	28
4. CONSIDÉRATIONS RELATIVES AUX ÉTUDES ET À LA CONSTRUCTION	36
4.1. Première identification	36
4.2. Choix des matériaux pour une construction économique	38
4.3. Mesures à adopter dans les études et la construction	38
5. RÉSUMÉ	46
6. RÉFÉRENCES	50

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	7
1. INTRODUCTION	9
2. ENGINEERING CONSEQUENCES FOR FILL DAMS	15
2.1. Piping Failure Mechanisms	15
2.2. Rainfall Erosion of Dispersive Soils	15
2.3. Experiences with Dispersive Clay Soils	19
3. IDENTIFICATION OF DISPERSIVE CLAYS	23
3.1. Field Identification Tests	23
3.2. Laboratory Tests	23
3.2.1. Crumb Test	25
3.2.2. SCS Double Hydrometer Test	27
3.2.3. Pinhole Test	27
3.2.4. Chemical Tests	29
4. ENGINEERING CONSIDERATIONS	37
4.1. Early Identification	37
4.2. Selection of Materials for Economic Construction	39
4.3. Design and Construction Measures	39
5. SUMMARY	47
6. REFERENCES	50

AVANT-PROPOS

Les argiles dispersives sont souvent mal connues des ingénieurs et autres spécialistes concernés par la construction des barrages en remblai. Elles peuvent être à l'origine de graves ennuis si elles ne sont pas utilisées en pleine connaissance et avec les précautions nécessaires. Il est important que les ingénieurs et spécialistes de barrages se familiarisent avec les propriétés de ces argiles, en particulier celles qui exigent une grande attention.

Ce Bulletin traite des propriétés de ces argiles et des mesures à prendre. Il sera donc d'une grande utilité à tous ceux mis en présence de ce matériau que l'on rencontre dans de nombreux pays.

Le Comité des États-Unis des Grands Barrages (USOLD) a bien voulu préparer ce Rapport. Qu'il en soit vivement remercié.

G. S. Larocque
Président du Comité des Matériaux
pour Barrages en Remblai

FOREWORD

Dispersive clays are generally poorly understood by engineers and other specialists who work on embankment dam construction. These clays may cause serious problems if they are used without adequate knowledge, and if the precautions required are not taken. It is important that dam engineers and specialists learn about the properties of these clays, especially those that require special attention during the design and construction of embankment dams.

This Bulletin reviews these properties and appropriate measures to be taken, and gives valuable information for all engineers concerned with this material present in many countries.

The United States Committee on Large Dams (USCOLD) has volunteered for this Bulletin. The authors deserve our warmest appreciation.

G. S. Larocque
Chairman, Committee on Materials
for Fill Dams

1. INTRODUCTION

De sérieuses difficultés peuvent survenir avec les argiles dispersives lorsque ces matériaux ne sont pas identifiés, ou si des moyens appropriés ne sont pas utilisés en vue de leur emploi dans les barrages en remblai. Le problème est largement répandu dans le monde, et la littérature comprend des rapports de ruptures de barrages, attribuées aux sols dispersifs, dans plusieurs pays. De nombreux travaux sur ces matériaux et leurs propriétés ont été publiés dans la littérature technique internationale.

Les argiles dispersives concernent des sols dans lesquels l'état physico-chimique de la fraction argileuse est tel que la présence d'eau relativement pure provoque la défloculation des particules individuelles d'argile, qui se repoussent les unes les autres (elles se dispersent). L'argile dans cet état est extrêmement érodable par un écoulement d'eau de faible gradient hydraulique, s'il existe des contraintes de traction. Des silts non cohésifs, de la farine de roche, des sables très fins, peuvent aussi se disperser dans l'eau et être extrêmement érodables, mais le processus de dispersion de ces matériaux est purement mécanique.

L'expérience montre que ce problème n'est pas généralement bien apprécié, bien que son importance et son étendue soient de nature à attirer l'attention des ingénieurs géotechniciens travaillant à la construction de grands barrages en remblai. En outre, les progrès, qui ont été faits récemment dans ce domaine, ne sont pas suffisamment connus.

Description

Dans le passé, les sols argileux étaient réputés être très résistants à l'érosion par écoulement d'eau, mais, dans les années récentes, il est apparu clairement qu'il existe dans la nature certaines argiles extrêmement érodables.

Quelques sols argileux dispersent ou défloculent en présence d'eau relativement pure et sont, de ce fait, particulièrement sujets à l'érosion et à la formation de renard. La tendance à l'érosion dispersive, dans un sol donné, dépend de plusieurs variables, telles que les natures chimique et minéralogique de l'argile, les sels dissous dans l'eau interstitielle et l'eau d'érosion [1] (*). De telles argiles sont érodées rapidement par un écoulement d'eau relativement lent, même comparativement aux sables fins sans cohésion ou aux silts. Quand un sol dispersif est immergé dans l'eau, la fraction argileuse tend à se comporter comme des particules isolées, c'est-à-dire que les particules argileuses ont un minimum d'attraction électrochimique et cessent d'adhérer étroitement ou d'être liées aux autres particules du sol. L'argile dispersive est alors érodée en présence d'un écoulement d'eau, car les plaquettes d'argile sont divisées et entraînées. Une telle érosion peut être créée par une percolation initiale à travers le remblai, par exemple dans des zones de haute perméabilité, particulièrement au contact avec des conduites ou des massifs de béton, au contact avec les fondations, le long de fissures de dessiccation, de fissures de tassement différentiel, de fissures dues à la saturation ou à la fracturation hydraulique. La principale

(*) Les chiffres entre crochets renvoient à la liste des références - Chapitre 6.

1. INTRODUCTION

Potential problems with dispersive clays are of such magnitude that serious engineering problems can result if the materials are not identified and appropriate action taken with respect to their use in embankment dams. The scope of the problem is worldwide, and the literature has reports of dam failures attributed to dispersive soils in many countries. Also, much work on these materials and their properties has been reported in the international technical literature.

Dispersive clays refer to clays in which the physico-chemical state of the clay fraction of the soil is such as to cause individual clay particles to deflocculate (disperse) and repel each other in the presence of relatively pure water. Clay in this state is highly erodible by waterflow with low hydraulic gradients and tractive stresses. Noncohesive silt, rock flour, and very fine sands also disperse in water and may be highly erodible, but the processes of dispersion of these materials are mechanical.

Experience indicates that although magnitude and scope for the problem are such as to warrant attention by geotechnical engineers working on large earthfill dams, the problem is not widely appreciated. Further, there have been recent advances in the field that are not generally recognized.

Description

In the past, clay soils were considered to be highly resistant to erosion by flowing water, but in the last few years, it has become more clearly understood that there exists in nature certain clays that are highly erodible.

Some natural clay soils disperse or deflocculate in the presence of relatively pure water and are, therefore, highly susceptible to erosion and piping. The tendency for dispersive erosion in a given soil depends on several variables such as mineralogy and chemistry of the clay and dissolved salts in the soil pore water and the eroding water [1] (*). Such clays are eroded rapidly by slow-moving water, even when compared to cohesionless fine sands and silts. When dispersive clay soil is immersed in water, the clay fraction tends to behave like single-grained particles, that is, the clay particles have a minimum of electro-chemical attraction and fail to closely adhere to or bond with other soil particles. Thus, dispersive clay soil erodes in the presence of flowing water when individual clay platelets are split off and carried away. Such erosion may be caused by an initial seepage through the embankment, e.g., areas of high soil permeability, especially around conduits, against concrete structures, and at foundation interface, desiccation cracks, differential settlement cracks, saturation settlement cracks, and/or hydraulic fracturing. The principal difference between dispersive clays and ordinary erosion-resistant clays appears to be the nature of the cations in the pore water of the clay mass. Dispersive clays have

(*) Numbers between brackets refer to references - Chapter 6.

différence entre les argiles dispersives et les argiles ordinaires résistant à l'érosion paraît correspondre à la nature des cations contenus dans l'eau interstitielle de la masse argileuse. Les argiles dispersives contiennent surtout du sodium dans l'eau interstitielle, alors que, dans les argiles ordinaires, les cations sont constitués principalement de calcium, magnésium et potassium [2].

Le phénomène des sols argileux dispersifs fut d'abord reconnu par les agronomes, il y a plus de 100 ans, et sa nature fondamentale était bien comprise des ingénieurs agricoles et spécialistes des sols, il y a près de 50 ans [3, 4]. L'importance de la question dans les travaux de génie civil a été reconnue dès 1940 environ, mais n'a été pleinement évaluée que vers 1960, quand des recherches sur des ruptures de barrages par renard, ayant pour origine le comportement d'argiles dispersives, ont été entreprises en Australie, à la suite de la rupture de nombreux petits barrages en argile [5, 41]. Depuis cette date, beaucoup d'études ont été faites afin de préciser les moyens susceptibles d'identifier les argiles dispersives, ce qui ne pouvait être fait avec les essais classiques de laboratoire, tels que : classement visuel, granulométrie, limites d'Atterberg [1, 6]. On avait observé qu'il y avait de grandes différences d'érodabilité pour des matériaux d'aspects similaires et de mêmes caractéristiques, alors que les échantillons avaient été prélevés à quelques mètres de distance seulement.

Les argiles dispersives sont très sujettes à l'érosion dispersive à cause de leurs caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques, déterminées durant leur formation. Quoiqu'il ne semble pas que ces caractéristiques puissent se présenter avec des matériaux non dispersifs placés dans un remblai, certains spécialistes soupçonnent que la dispersivité de matériaux sensibles puisse augmenter avec le temps. D'autres pensent que, quand une argile dispersive sèche n'a pas été humidifiée assez longtemps, elle peut montrer des propriétés dispersives qui disparaissent après une période de 3 à 5 semaines. On estime que les conditions de la dispersivité sont différentes de celles de la thixotropie que présentent les argiles dites « rapides », qui deviennent fluides quand elles sont soumises à des vibrations.

Facteurs géographiques et climatiques

Les argiles dispersives ne sont pas associées à une origine géologique spécifique, mais on les rencontre le plus souvent comme argiles alluviales sous forme de colluvions de pente, de dépôts lacustres, de dépôts de loess, et de dépôts dans les lits majeurs des rivières. En certains endroits, l'eau interstitielle des roches ou des schistes argileux, provenant de dépôts marins, contient les mêmes sels que des argiles dispersives, et leurs sols résiduels sont dispersifs. En Afrique Australe (comprenant le Zimbabwe, le Swaziland et l'Afrique du Sud), la dispersivité a été associée à des granites, des granodiorites et des grès [19, 40]. En Nouvelle-Zélande, les plus dangereuses situations sont celles dans lesquelles l'eau de lessivage est très pure, mais avec de légères traces de sodium; ceci est caractéristique des zones où le sel marin est dispersé par le vent.

Dans les zones où les argiles dispersives présentent une pente raide, leur surface d'érosion est facilement reconnaissable, grâce à des formes caractéristiques avec des rides sinueuses, dentelées et profondes, formant rapidement des chenaux et des conduits.

Dans les zones horizontales ou faiblement inclinées, il n'y a généralement pas de marques superficielles de la présence d'argiles dispersives. Ceci est dû à une

a preponderance of sodium, whereas ordinary clays have a preponderance of calcium, potassium, and magnesium cations in the pore water [2].

Dispersive clay soil phenomena were first noted by agronomists over 100 years ago, and their basic nature was fairly well understood by soil scientists and agricultural engineers nearly 50 years ago [3, 4]. The importance of the subject in civil engineering practice has been recognized since about 1940 but not widely appreciated until the early 1960's when research on piping failure in earth dams due to dispersive clay behavior was initiated in Australia because of many failure of small clay dams [5, 41]. Since that time, many investigations have been performed to refine procedures for identifying dispersive clays as they cannot be identified by the conventional laboratory index tests such as visual classification, gradation, or Atterberg limits [1, 6]. It has been observed that there can be great differences in erodibility in materials with similar visual appearance and index properties when the samples were taken from locations only a few feet apart.

Dispersive clays are materials which are highly susceptible to dispersive erosion because of their chemical, physical, and mineralogical qualities determined during their formation. Although these qualities are not expected to develop in an embankment with nondispersive materials, some soil scientists suspect that dispersiveness of susceptible materials may increase with time. Others feel that when a dry dispersive clay has not been watered long enough, it may show dispersive properties which disappear after 3 to 5 weeks of maturing period. The qualities of dispersiveness are believed to be somewhat different from the thixotropic qualities of so-called quick clays which become fluid upon vibration.

Geographic and Climatic Factors

Dispersive clays have not been associated with any specific geologic origin, but most encountered to date have been found as alluvial clays in the form of slope wash, lakebed deposits, loess deposits, and flood plain deposits. In some areas, clay stone and shales laid down as marine deposits have the same pore water salts as dispersive clay, and their residual soils are dispersive. In Southern Africa (including Zimbabwe, Swaziland and South Africa), they have been associated with granites, granodiorites, and sandstones as well [19, 40]. In New Zealand, the most hazardous situations are those in which the leaching waters are very pure, but contain slight traces of sodium. This is typical of the New Zealand situation where there is widespread windblown sea salt.

In areas of steep topography where dispersive clays exist, there is an easily recognizable surface erosion of characteristic pattern with jagged, sinuous ridges, and deep, rapidly forming channels and tunnels.

In gently rolling or flat areas, there is frequently no surface evidence of dispersive clay due to an overlying protective layer of silty sand or topsoil from

couche protectrice de sables silteux, ou d'un sol dont les particules dispersives ont disparu. L'absence de surface d'érosion caractéristique ne traduit pas nécessairement qu'il n'y a pas d'argiles dispersives. Les sols dispersifs peuvent être rouges, bruns, gris, jaunes ou présenter diverses combinaisons de ces couleurs. Les sols noirs, qui contiennent manifestement une haute teneur en matières organiques, ne sont pas dispersifs [7]. Les essais effectués sur des sols à fine granulométrie provenant de la décomposition *in situ* de roches ignées ou métamorphiques, ainsi que sur des sols provenant de calcaires, ont montré qu'il y en avait peu de dispersifs (à l'exception de granites et granodiorites) [1, 19].

A la suite d'anciennes études, on pensait que les argiles dispersives n'avaient été formées que dans des climats arides ou semi-arides, et dans des zones de sols alcalins. Récemment des sols dispersifs et des problèmes d'érosion ont été trouvés sous des climats humides, dans diverses régions. Les pays qui ont eu des problèmes avec les argiles dispersives sont : l'Australie, le Mexique, Trinidad, le Vietnam, l'Afrique du Sud, la Thaïlande, l'Inde, Israël, le Ghana, le Brésil, le Venezuela, et plusieurs régions du sud des États-Unis. Des sols dispersifs sont trouvés dans 60 % du Zimbabwe [40], et une rupture de barrage due à des sols dispersifs s'est produite au Kenya.

which the dispersive clay particles have been removed. The absence of surface erosion patterns typical of dispersive clays does not necessarily indicate that no dispersive clays are present. Dispersive clay soils can be red, brown, gray, yellow, or various combinations of these colors. Black soils with obviously high organic content are not dispersive [7]. Of fine-grained soils tested, known to be derived from *in situ* weathering of igneous and metamorphic rocks, as well as all soils derived from limestone, few are dispersive (with the exception of granites and granodiorites) [1, 19].

From early studies, it was believed that dispersive clays were associated only with soils formed in arid or semiarid climates and in areas of alkaline soils. In recent years, the same soils and erosion problems have been found to exist in humid climates in various locations. Parts of the world that have experienced problems with dispersive clays include Australia, Mexico, Trinidad, Vietnam, South Africa, Thailand, India, Israel, Ghana, Brazil, Venezuela, and many parts of the Southern United States. Soils which are dispersive are found in 60 % of Zimbabwe [40], and an embankment dam failure from dispersive soils has been reported in Kenya.

2. CONSÉQUENCES SUR LA TECHNIQUE DES BARRAGES EN REMBLAI

2.1. MÉCANISME DES RUPTURES PAR RENARD

Dans l'explication classique de la rupture d'un barrage en remblai, par renard, la fuite concentrée émergeant à l'aval est causée par un écoulement d'eau à travers les interstices du sol. L'érosion débute à l'extrémité aval de la fuite, une concentration locale de l'écoulement causant des forces d'érosion. Cette érosion progresse ensuite vers l'amont, en créant un passage en forme de conduit, ou « renard », jusqu'à ce qu'elle atteigne la source de l'eau; à ce moment, une rupture rapide, catastrophique, peut se produire. Cette érosion se rencontre principalement dans des sols sans cohésion qui présentent peu de résistance aux forces d'érosion de l'eau de percolation.

A la différence de l'érosion en l'absence de forces de cohésion, l'érosion dans les argiles dispersives n'est pas le résultat de percolations dans les interstices de la masse d'argile. Avec les argiles dispersives, le renard est dû à un processus de défloculation dans lequel l'eau circule à travers un canal d'écoulement, tel qu'une fissure, et l'érosion de la paroi de ce canal se produit simultanément sur toute sa longueur. Un écoulement concentré est nécessaire pour que l'érosion puisse commencer. Comme avec certains sols érodables, l'érosion, dans les remblais construits avec des matériaux dispersifs, se produit dans les zones de fissures probables, par exemple autour des conduits, aux contacts entre zones non compatibles du point de vue contraintes, déformations et déplacements (aussi bien dans le barrage que dans les appuis ou la fondation, ou encore dans les zones soumises à dessiccation).

Un des facteurs caractéristiques régissant la sensibilité au renard dans les sols dispersifs est la proportion des cations sodium adsorbés à la surface des particules d'argile, par rapport aux autres cations (calcium, magnésium, potassium). Le second facteur est la teneur totale en sels dissous de l'eau du réservoir : moins il y a de sels dissous, plus grande est l'aptitude à la dispersion de l'argile saturée en sodium. Une eau très calcaire est en général peu apte à provoquer la dispersion des argiles.

Quand un écoulement concentré se produit à travers un remblai construit avec des sols argileux dispersifs, deux conséquences sont possibles : 1) Si la vitesse est inférieure à un certain seuil, l'argile entourant le canal gonfle et progressivement arrête l'écoulement; 2) Si la vitesse initiale est supérieure au seuil, les particules d'argile défloculées sont entraînées, avec une augmentation de la section du canal plus rapide que sa réduction par suite du gonflement, conduisant ainsi progressivement à une rupture par renard.

2.2. ÉROSION DES SOLS DISPERSIFS PAR LA PLUIE

Il y a lieu de considérer les surfaces d'érosion des sols dispersifs si l'on veut utiliser ces matériaux dans les parements amont ou aval des barrages en remblai. Par suite de la très faible teneur en sels dissous contenus dans l'eau de pluie, l'érosion des sols dispersifs (identifiée par Harmse [13, 46]) sera intense. Les pentes

2. ENGINEERING CONSEQUENCES FOR FILL DAMS

2.1. PIPING FAILURE MECHANISMS

In the classical explanation of piping failure in an earth embankment dam, the concentrated leak emerging at the downstream side is caused by water flowing through the pores of the soil. The erosion starts first at the discharge end of the leak, causing a local concentration of seepage and erosion forces. The erosion progresses upstream forming a tunnel-shaped passage or pipe until it reaches the water source, at which time a rapid, catastrophic failure may result. The erosion occurs mainly in cohesionless soils which have little resistance to the erosive forces of the seeping water.

Unlike erosion in the absence of cohesive bond, erosion in dispersive clay is not a result of seepage through the pores of a clay mass. With dispersive clay, piping is due to a deflocculation process where water travels through a leakage channel, such as a crack, and the erosion of the wall of the leakage channel occurs simultaneously along its entire length. A concentrated leak must be prevalent for erosion to initiate. As with any erodible soil, erosion in embankments constructed with dispersive soils occurs in areas of high crack potential such as around conduits, at the contacts between zones of incompatibilities of stresses, strains, and deformations both within the embankments and at foundation and abutments or in areas of desiccation.

One of the properties governing the susceptibility to dispersion piping is the percentage of adsorbed sodium cations on the surface of the clay particles relative to the quantities of other cations (calcium, magnesium, and potassium). A second factor governing susceptibility of a clay mass to dispersion piping is the total content of dissolved salts in the reservoir water : the lower the dissolved salts, the greater the susceptibility of sodium saturated clay to dispersion. A water rich in calcium shows in general a lower responsibility for dispersion of dispersive clays.

When a concentrated leak starts through an embankment constructed of dispersive clay soil, either of two actions can occur : 1) if the velocity is below a threshold value, the clay surrounding the flow channel swells and progressively seals off the leak; or 2) if the initial velocity is above a threshold value, the dispersed clay particles are carried away, enlarging the flow channel at a faster rate than it is closed by swelling, leading to progressive piping failure.

2.2. RAINFALL EROSION OF DISPERSIVE SOILS

Surface erosion of dispersive soils is a pertinent consideration for the use of these materials in the upstream or downstream slopes of embankment dams. Due to the low content of dissolved salts in rainwater, erosion of dispersive soils [as identified by Harmse (13, 46)] will be severe. Slopes can be protected by adequately

peuvent être protégées par des plantations convenables de graminées, ou par stabilisation avec de la chaux, du gypse ou du sulfate d'aluminium, ou par une couche de graviers, avec intercalation d'un filtre convenable et/ou d'un géotextile filtrant. Une érosion mécanique en plaques ou superficielle peut être produite par la pluie sur des sols cohésifs, souvent conjointement avec une érosion dispersive. La désagrégation des grains du sol contribue à l'érodabilité en plaques du sol et peut aussi être un facteur d'érosion interne, survenant dans un sol argileux dispersif, quand une surface sèche permet le contact de l'eau avec la masse du sol. La réaction, par la surface, de la masse du sol à la présence d'eau est essentiellement celle des parcelles de sol, et la désagrégation résulte de la division des parcelles en fragments séparés, quand elles sont immergées dans l'eau. Cette division peut aller jusqu'à la dimension de la plaquette individuelle d'argile, quand les parcelles sont composées d'argile dispersive. Deux causes de désagrégation sont : le remplacement de l'air occlus par de l'eau, et les efforts de cisaillement causés par le gonflement [10].

Les talus naturels de sols non dispersifs, normalement couverts de végétation et contenant des matières organiques, dans les zones humides, souffrent peu de l'érosion. Les sols dispersifs ne sont généralement pas présents dans les zones superficielles des talus naturels, à cause du phénomène éluvial, qui consiste dans le mouvement des particules d'argile vers le bas du talus. Une étude des argiles dispersives dans l'État du Mississippi a montré que, bien que des pluies sévères aient développé des conduits d'érosion dans beaucoup de petits barrages, aucun dommage n'avait été causé dans les sols non remaniés, contigus aux barrages [11].

Une étude de laboratoire reproduisant les conditions naturelles a montré que, lorsqu'un sol kaolinique était humidifié lentement à partir de la surface, il ne se formait pas de desserrement, quelle que soit la profondeur; par contre, si l'humidification était rapide par suite d'une forte pluie, il y avait un desserrement à une profondeur appréciable. Dans le premier cas, la phase d'eau vapeur pénètre le sol en profondeur, permettant le déplacement de l'air. Mais l'eau qui est introduite rapidement en phase liquide provoque le desserrement.

Une autre étude [13] a décrit le développement d'une érosion intense, en chenaux et conduits, dans des talus de déblais ou de remblais sans végétation, à la suite d'une forte pluie survenant après une sécheresse. Des talus de remblais, constitués d'argiles dispersives et couverts de végétation, ont également montré de profonds conduits d'érosion sous certaines conditions climatiques, par exemple fortes pluies suivant une période de sécheresse.

On a établi une relation [14] entre le pourcentage de sodium et la quantité totale de sels solubles (ou concentration ionique totale) dans l'eau interstitielle des sols de barrages détériorés par la pluie. La plupart des barrages en terre ayant subi une érosion par la pluie avaient d'excellentes couvertures herbeuses. On a pensé à l'époque (1972) que seuls les barrages dont les sols contenaient moins de 15 meq/l (*) en sels solubles étaient susceptibles d'une érosion par la pluie. Mais on a montré ultérieurement que l'érosion par la pluie pouvait se produire sur des remblais compactés, avec une quantité totale de sels solubles allant de 50 à 150 meq/l [1, pp. 3-12 et 432-466], [15]. On a aussi noté que certains sols, classés comme dispersifs par des essais de laboratoire, pouvaient ne pas montrer sur des talus gazonnés, ou même sur des talus nus, d'érosion due à la pluie plus intense

(*) meq/l = milliéquivalent par litre.

grassing the slopes; by stabilization with lime, gypsum, or aluminium sulphate; or by using a gravel layer with suitable filter layers and/or geotextile filter fabrics. Sheet or surface mechanical erosion by rainfall may occur in cohesive soil masses, often in conjunction with dispersive erosion. Slaking of soil grains contributes to the sheet erodibility of soil masses and may also be a factor in internal erodibility occurring in a dispersive clay soil when a dry surface is present for water contact within the soil mass. Reaction by the surface of the soil mass to the presence of water is essentially that of soil crumbs, and slaking is the breakup of soil crumbs into discrete fragments when immersed in water. This breakup may proceed to individual clay platelet size when the crumb particles are composed of dispersive clay. Two causes of slaking are replacement of entrapped air by water and internal shear stresses caused by swelling [10].

Natural slopes in nondispersive soils, normally covered with vegetation and containing organic matter in the topsoil in humid areas, usually suffer little erosion. Dispersive soils are usually not present in the topsoil of natural slopes due to the process of eluviation, which is the movement of clay particles downward in the soil profile. One study of dispersive clays in the State of Mississippi showed that, although severe rainfall erosion tunnels developed in many small dams, no rainfall damage was found in the undisturbed natural soil adjacent to the dams [11].

A study relating laboratory behavior to field situations [12] showed that when kaolinitic soil was wetted slowly from the surface, it did not slake to any depth, but when wetted quickly by a heavy rain it slaked to an appreciable depth. In the first case, vapor phase water entered the subsurface soil, allowing air to be displaced. Water that was quickly introduced in liquid form caused slaking.

Another study [13] described development of severe rill and tunnel erosion in nonvegetated cut and fill slopes of dispersive clay when there was heavy rainfall following a drought. Vegetated fill slopes of dispersive clay also exhibited severe tunnel erosion under certain climatic conditions, e. g., heavy rainfall following a drought.

A relationship was developed [14] between percent sodium and total soluble salts (same as total ionic concentration) in the soil pore water extract for earth dams that were damaged by rainfall erosion. Most of the earth dams that experienced rainfall erosion had excellent grass cover on the slopes. It was thought at the time (1972) that only dams with soils containing less than 15 meq/l (*) total soluble salts were susceptible to rainfall erosion. It has subsequently been shown that rainfall erosion can occur on compacted earthfills with total soluble salts in the range of 50-150 meq/l [1, pp. 3-12 and 432-466] [15]. It has also been noted that some soils classified dispersive by laboratory tests may not exhibit rainfall erosion on vegetated fill slopes or cut slopes any more severe than for nondispersive soils. This difference in dispersive clay behavior may be due to cracking potential, rate of swelling to close

(*) meq/l = milliequivalent per litre.

comparativement à des sols non dispersifs. Cette différence dans le comportement des argiles dispersives peut être due aux fissures potentielles, à la vitesse du gonflement pour refermer les fissures, aux conditions climatiques, ou à la vitesse de mise en suspension des particules colloïdales [1, pp. 3-12], [16]. La succession des épisodes d'humidification et de dessiccation joue un rôle important dans la dispersivité des argiles dispersives.

2.3. EXPÉRIENCE ACQUISE SUR DES SOLS ARGILEUX DISPERSIFS

L'identification des argiles dispersives est si récente dans le génie civil que seuls quelques grands barrages ont été réalisés avec ces matériaux depuis que les ingénieurs sont informés de leurs problèmes. Des milliers de barrages en remblai, construits suivant les méthodes classiques, ont montré très peu de ruptures ou de problèmes de renards, et, dans la majorité des cas, ces accidents étaient dus à des conditions non prévues par le projeteur, telles qu'un contrôle de qualité insuffisant, ou des caractéristiques géologiques non identifiées lors des reconnaissances. Les seules exceptions à ces comportements satisfaisants ont été des ruptures de barrages en terre homogènes où les fuites sortaient sur le parement aval sans avoir traversé des filtres. Beaucoup de ces barrages étaient relativement petits et de construction économique, notamment des barrages pour réserves agricoles construits avec peu de soins techniques [1].

La plupart des problèmes signalés sur des argiles dispersives sont survenus à des barrages construits avant la connaissance et l'identification des difficultés associées à ces matériaux. Ces problèmes étaient les suivants : érosion interne ou renard, formation de conduits, érosion de surface et « jugging » [formation d'une partie verticale d'un conduit d'érosion dont la base est plus large que le haut, ressemblant ainsi à une cruche (jug)].

Pratiquement toutes les études ont montré que les ruptures des ouvrages construits en argile dispersive survenaient lors de la première humidification. Ceci comprenait les cas où le niveau de la retenue avait été monté, après être resté un certain temps à une cote inférieure. Toutes les ruptures étaient associées à la présence d'eau en même temps que de fissures par retrait, tassement différentiel, fracturation hydraulique ou défauts de construction [1, pp. 135-155 et 370-389], [6, 10, 11, 17]. La fissuration a été reconnue comme facteur principal, puisque tous les barrages qui ont péri par érosion interne l'ont été durant le premier remplissage ; les conduits et le « jugging » étaient souvent présents sans érosion de surface (en plaques). Une autre condition de rupture est qu'il doit y avoir une quantité suffisante de matériaux d'une dimension permettant à l'écoulement initial de démarrer le processus d'agrandissement. On a aussi montré que dans les sols dispersifs les fissures verticales pouvaient s'élargir en s'approfondissant depuis la partie supérieure jusqu'à la partie inférieure où l'écoulement d'eau s'établit sans occuper le haut de la fissure [7].

En plus de la rupture par renard des barrages en terre homogènes, lors du premier remplissage, il est aussi possible qu'une telle rupture survienne ultérieurement, si la concentration ionique de l'eau de la retenue se trouve fortement réduite. La modification de la concentration, nécessaire pour que cela se produise, n'a pas été déterminée avec précision. Cependant, un exemple vécu peut être instructif. Un barrage australien, construit dans une zone de sols salins et dont l'eau de la retenue

cracks, climatic conditions, or rate at which colloidal particles go into suspension [1, pp. 3-12], [16]. Wetting and drying time history plays an important role in the dispersivity of dispersive clays.

2.3. EXPERIENCES WITH DISPERSIVE CLAY SOILS

General recognition of dispersive clays in civil engineering practice is so recent that only a few major dams have been built using these materials since engineers have become aware of the problem. Experience with thousands of earth embankment dams built according to current accepted practice has shown very few failures or problems from piping, and almost all of those were attributable to some unforeseen condition by the designer such as inadequate construction quality control or a geologic condition not discovered during explorations. The only exceptions to these satisfactory performances were failures of homogeneous earth dams where leaks emerged on the downstream slope without having passed through filters. Many of these dams were relatively small and economically constructed, including farm pond dams built with minimal engineering attention [1].

Most of the problems reported with dispersive clays occurred in existing dams constructed prior to recognition and identification of difficulties associated with dispersive clays. Problems that resulted were internal erosion or piping, tunnelling, surface erosion, and jugging (the formation of the vertical portion of an underground erosion tunnel where the base is larger than the top, hence resembling a jug).

Virtually all studies have shown that failures of structures built of dispersive clay soils occurred on first wetting. This included cases where the reservoir level was raised after having been at a given elevation for a period of time. All failures were associated with the presence of water together with cracking by shrinkage, differential settlement, hydraulic fracturing, or construction deficiencies [1, pp. 135-155, and 370-389] [6, 10, 11, 17]. Cracking has been determined to be a major contributing factor since all dams that failed by internal erosion failed during first filling, and tunnelling and jugging were often present without surface (sheet) erosion. Another condition for failure is that there must be a significant amount of material of a size which the initial flow of water could move to start the enlarging process. It has also been shown that vertical cracks in dispersive clay soils can enlarge by sloughing of the upper walls into the lower reaches when water enters the lower portion of the crack, even though there was no flow through the upper crack [7].

In addition to dispersive clay piping failure in homogeneous earth dams upon first filling of the reservoir, it is also possible for piping failure to occur at some later time if the ionic concentration of the reservoir water is substantially reduced. The required change in concentration for this effect has not been precisely determined. However, a case history may be instructive. In an Australian dam, in an area of saline soil where the reservoir was originally filled with well water relatively high in ionic

avait à l'origine une concentration ionique relativement élevée (26 meq/l), a résisté pendant des années, bien qu'on y ait noté continuellement des pertes par percolation [18]. Après la mise en service d'une conduite de 32 km, amenant de l'eau d'une rivière de faible concentration ionique (1,2 meq/l), le barrage a été détruit par un renard en sol dispersif, en 3 jours.

Plusieurs études ont été faites sur des sites, où on ne disposait que d'argiles dispersives pour réaliser l'étanchéité du barrage, et où les fondations et les appuis étaient aussi constitués d'argiles dispersives d'épaisseur suffisante pour s'opposer aux fuites [1, pp. 3-12]. On a conclu que le risque de renard se développant en profondeur dans des formations d'argiles dispersives saturées, au-dessous des fissures de dessiccation, ou la possibilité d'affaissement en milieu saturé était négligeable et ne justifiait pas de dispositions de protection renforcée.

On connaît seulement quelques cas [1, pp. 94-109] de barrages de faible hauteur, en région aride, où des renards ont traversé le sol naturel des fondations ou des appuis, à 1 ou 2 m sous le remblai du barrage, probablement à la suite de fuites provoquées par des fissures de tassement ou de dessiccation. Presque toutes les ruptures dans les argiles dispersives ont été causées par des renards dans le remblai lui-même, et on ne connaît aucun cas de renard profond passant dans les fondations.

La présence d'argiles dispersives sur de grandes surfaces géographiques dans le monde n'étant connue que depuis peu de temps, on peut en conclure que beaucoup de petits barrages homogènes ont été construits en argiles dispersives, à une époque où elles étaient considérées comme les seuls matériaux économiques disponibles pour des barrages en terre. D'ailleurs, beaucoup de ces barrages ont un comportement satisfaisant depuis longtemps. Cette expérience montre que, au moins en ce qui concerne les petits barrages, les méthodes courantes de projet et de construction des barrages en remblai, y compris la définition convenable de filtres et le contrôle soigneux de la construction, peuvent conduire à la sûreté des barrages, qu'il soit fait usage, ou non, d'argiles dispersives. Très peu de cas de ruptures de barrages en argiles dispersives ont été observés, si ces matériaux ont été compactés du côté humide de l'optimum et s'ils ont été protégés contre la dessiccation par des couches de filtre appropriées. Beaucoup plus de ruptures surviennent sur les petits barrages, qui sont généralement sommairement étudiés et qui ont rarement des filtres, que sur les grands ouvrages. Par conséquent, l'utilisation d'argiles dispersives dans des petits barrages exige une excellente technique. En ce qui concerne les grands barrages, où les risques, etc. sont plus grands, il y a lieu de procéder à un examen spécifique et approfondi de l'efficacité du filtre pour empêcher tout mouvement de particules. Dans le cas de grands barrages en enrochement, avec noyau mince ou relativement mince, l'utilisation de tels sols pour le noyau requiert une très grande attention. De toute façon, l'utilisation satisfaisante d'argiles dispersives nécessite leur reconnaissance et leur identification; pour des barrages en remblai, des mesures techniques appropriées doivent être prises.

concentration (26 meq/l), the dam was stable for some years although continuous seepage losses were noted [18]. Following completion of a 20-mile pipeline to bring water of lower ionic concentration (1.2 meq/l) from a river, the dam failed by dispersive soil piping within 3 days.

Several sites have been studied where only dispersive clay was available for the impervious section of the dam, and the abutments and foundation were also of dispersive clay of sufficient thickness to provide a seepage cutoff (1, pp. 3-12). It was concluded that the risk of piping tunnels extending deep into saturated formations of dispersive clay below the depth of drying cracks or potential collapse on saturation was negligible and did not justify extensive protective design measures.

There are only a few cases [1, pp. 94-109] of low dams in arid regions where piping tunnels passed through natural soil foundations or abutments a few feet below the bottom of the dam embankment, probably from leaks originating in drying or settlement cracks. Almost all dam failures due to dispersive clays have been by tunnels in the embankment itself, and there are no known cases of deep tunnels in the foundation.

With recent knowledge that dispersive clays are found throughout widespread geographic areas of the world, it is reasonable to conclude that many small, homogeneous dams exist which were constructed of dispersive clays, as those materials at the time would have been considered the only economically available materials for earth dam construction. Further, many of those dams have performed well for long periods of time. This experience indicates that insofar as smaller dams are concerned, engineering practice for designing and building embankment dams, including use of well designed filters and careful construction control, can result in safe dams whether dispersive clay is used or not. Very few cases of dispersive clay failures are observed when compacted on the wet side of optimum moisture and protected against drying by adequate filter layers. Far more failures occur in small dams, which are generally more poorly engineered and seldom have filters, than major structures. Therefore, the use of dispersive soils in small dams calls for careful engineering. In regard to major dams with higher risk hazards, etc., the approach should be one of caution based on indepth, specific studies concerning the effectiveness of the filter in arresting any grain movements. In thin and moderately thin cores of high rockfill dams, it is desirable to exercise extreme caution in the use of such soils in the core. However, successful use of dispersive clays requires their recognition and identification, and when used in fill dams, appropriate engineering measures must be taken.

3. IDENTIFICATION DES ARGILES DISPERSIVES

L'identification des sols dispersifs doit commencer par des reconnaissances *in situ*, afin de déceler d'éventuels indices en surface, tels que formes d'érosion inhabituelles avec conduits et profonds ravinements, et aussi turbidité excessive de l'eau de retenue. Les zones de faible fertilité et de croissance rabougrie peuvent être une indication de sols fortement salins, dont beaucoup sont dispersifs. Cependant, des sols dispersifs peuvent également se rencontrer dans des terrains neutres ou acides, et permettre la croissance d'une herbe luxuriante [19]. Si l'aspect de la surface peut constituer une forte présomption de sols dispersifs, l'absence d'un tel indice ne doit pas exclure la possibilité d'argile dispersive en profondeur, et il faut procéder à des reconnaissances complémentaires. Une évaluation initiale des caractéristiques des sols dispersifs en place peut être très utile.

3.1. ESSAIS D'IDENTIFICATION *IN SITU*

Des essais *in situ*, simples et rapides, peuvent être utiles pour une première estimation du caractère dispersif ou non dispersif d'un sol. Cependant, il faut savoir que la fiabilité de tels essais est limitée et que des essais en laboratoire doivent préciser la dispersivité du sol :

— Essai sur une « miette » (crumb test). Un échantillon de sol est placé dans l'eau et la dispersion est évaluée suivant le degré de turbidité de l'eau.

— Essai à la « goutte » (drop test). On fait tomber des gouttes d'eau sur un échantillon d'argile. L'eau et les produits d'érosion sont recueillis dans un récipient et on évalue qualitativement la dispersion suivant la turbidité de l'eau.

— Essai à l'ultraviolet. De l'acétate de zinc et d'uranyle est mélangé à une petite quantité de sol. L'intensité de la fluorescence est observée visuellement et est utilisée comme moyen d'évaluation du sodium présent. D'après certains, c'est une bonne indication dans environ 40 % des cas.

— Essai de turbidité. Essai à l'hydromètre modifié. Un rapport de turbidité inférieur à 4 indique de la dispersivité, et de 9 environ l'absence de dispersivité. Il est nécessaire de faire un historique des essais pour mettre au point un classement des rapports de turbidité.

— Formes d'érosion. Les formes d'érosion causées par la pluie et l'écoulement sur les bords des rivières peuvent donner une bonne indication sur la dispersivité du sol.

3.2. ESSAIS EN LABORATOIRE

Les sols dispersifs ne sont pas identifiables par reconnaissance visuelle ou utilisation des essais classiques de laboratoire, tels que : analyse granulométrique, ou limites d'Atterberg; aussi, d'autres essais de laboratoire ont-ils été mis au point pour y parvenir. Les argiles doivent être examinées, sous l'angle de leurs caractéris-

3. IDENTIFICATION OF DISPERSIVE CLAYS

Identification of dispersive soils should commence with field reconnaissance to determine if there are any surface indications, such as unusual erosional patterns with tunnels and deep gullies, together with excessive turbidity in any storage water. Areas of poor crop production and stunted growth may also indicate highly saline soils, many of which are dispersive. However, dispersive soils can also occur in neutral or acidic soils and can support lush grass growth [19]. Although surface evidence can give a strong indication of dispersive soils, lack of such evidence does not in itself preclude the presence of dispersive clay at depth, and further explorations should proceed. An initial assessment of the dispersive characteristics in the field could be very useful.

3.1. FIELD IDENTIFICATION TESTS

Simple, quick field tests can be helpful in gaining a preliminary evaluation of the dispersive or nondispersive character of a soil. However, it should be recognized that the reliability of these tests is limited, and laboratory tests should be used to further define the dispersibility of the soil.

— Crumb test. The soil crumb is placed in water and the dispersion observed as the degree of muddiness of the water.

— Drop test. Waterdrops are dropped on a clay specimen. The water and the erosion products are collected in a vessel below the specimen to qualitatively assess dispersive material based on degree of muddiness.

— Ultraviolet light test. Uranyl zinc acetate is mixed with a small crumb of soil. The intensity and amount of florescence is observed visually and used as indicator of the amount of sodium present. This is believed by some to be a successful indicator in about 40 % of the cases.

— Turbidity test. Modified hydrometer test. A turbidity ratio less than four shows dispersion and about nine no dispersion. Requires a test history to develop ranges in turbidity ratio.

— Field erosion patterns. The erosion patterns caused by rain and runoff of soil at riverbanks can provide a good indication of the dispersivity of the soil.

3.2. LABORATORY TESTS

Dispersive soils cannot be identified by visual soil classification or the standard laboratory index tests such as grain-size analysis or Atterberg limits and, therefore, other laboratory tests have been devised for this purpose. Clays should be tested for dispersive characteristics as a routine procedure during feasibility studies for earth

tiques dispersives, de façon systématique, lors des études de faisabilité de barrages en terre ou d'autres ouvrages hydrauliques dans lesquels leur emploi pourrait présenter des dangers. On a pensé que la grande variabilité de comportement dispersif, démontrée par différents essais, provenait d'un manque de soins méticuleux dans l'exécution des essais. Il est donc impératif de conduire les essais avec beaucoup d'attention. Ceci est particulièrement vrai dans le cas du « pinhole test » (essai du « trou d'épingle ») et des dispositions spéciales ont été proposées pour éviter de tels inconvénients dans cet essai qui est considéré comme l'un des moyens les plus utiles [24].

Les essais le plus généralement effectués en laboratoire sont : le « crumb test », l'essai de dispersion SCS (Soil Conservation Service) ou au double hydromètre, le « pinhole test », la mesure des sels dissous dans l'eau interstitielle et l'essai ESP (exchangeable sodium percentage — pourcentage de sodium échangeable). Les quatre premiers essais sont couramment utilisés aux États-Unis et le cinquième est l'un des plus courants et des plus fiables en Australie [5, 20, 21, 22, 23], en Afrique du Sud [19] et au Zimbabwe [40]. Il est important que les échantillons de sol soient conservés et essayés à leur teneur en eau naturelle, parce que le séchage, en particulier le séchage au four, peut altérer leurs caractéristiques dispersives [1, 2, 24]. Bien que les différents essais donnent des résultats valables pour beaucoup de sols, il y a cependant un certain nombre d'exceptions. Aussi, est-il prudent de procéder à tous les essais sur chaque échantillon de sol.

3.2.1. « Crumb test » (essai sur une « miette »)

Le « crumb test » (essai sur une « miette ») d'Emerson [25] a été mis au point afin de reconnaître un comportement dispersif *in situ*, mais maintenant on l'utilise souvent comme essai de laboratoire. L'essai est exécuté, soit en préparant un échantillon cubique, de 15 mm environ de côté, soit en choisissant un morceau de sol séché à l'air, d'un volume à peu près équivalent. (Il serait préférable d'utiliser un fragment de sol à la teneur en eau naturelle). L'échantillon est placé soigneusement dans environ 250 ml d'eau distillée. Quand le fragment de sol commence à s'hydrater, on observe la tendance des particules colloïdales à défloculer et à se mettre en suspension. Les résultats sont notés à différents intervalles de temps et on distingue 4 degrés de réaction : 1) pas de réaction; 2) légère réaction; 3) réaction modérée; et 4) forte réaction (nuage colloïdal couvrant complètement le fond du récipient) (*). On réalise souvent le « crumb test » en eau distillée et en eau de rivière, pour une étude comparative.

Le « crumb test » donne une bonne indication sur les possibilités d'érosion des sols argileux; cependant un sol dispersif peut parfois ne pas donner de réaction avec le « crumb test ». Si cet essai indique une dispersivité, le sol est très probablement dispersif. Le mode opératoire de cet essai à l'USBR (US Bureau of Reclamation) est complètement décrit dans le document USBR 5400 : « Méthode pour déterminer la dispersivité de sols argileux au moyen du crumb test » [26].

(*) Il existe des versions légèrement différentes pour le « Crumb Test » d'Emerson.

dams and other hydraulic structures in which it may be used for critical features. It has been proposed that much of the variability in dispersive behavior between different tests arises from the lack of scrupulous care in the tests procedures. This presents a strong case for exercising great care in conducting the tests. In the case of the pinhole test, this has been especially true, and special provisions have been proposed to avoid such problems in this test which is considered one of the most useful tools [24].

The tests most generally performed are the laboratory crumb test, the SCS (Soil Conservation Service) laboratory dispersion or double hydrometer test, the pinhole test, the test of dissolved salts in the pore water, and the ESP (exchangeable sodium percentage) based tests. The first four tests are most commonly used in the United States, and the fifth test is the one most common and reliable in Australia [5, 20, 21, 22, 23], South Africa [19], and Zimbabwe [40]. It is important that all soil specimens be maintained and tested at their natural moisture content since drying, especially oven-drying, may alter dispersive characteristics [1, 2, 24]. While the several tests give consistent results for many soils, there are a significant number of exceptions. Consequently, it is prudent to perform all the tests on each soil sample.

3.2.1. The Crumb Test

The Emerson Crumb Test [25] was developed as a simple procedure to identify dispersive behavior in the field, but is now often used in the laboratory as well. The test consists of either preparing a cubical specimen of about 15 mm on a side or selecting an air-dried soil crumb of about equal volume. (It would be preferable to use a crumb at natural soil moisture.) The specimen is carefully placed in about 250 ml of distilled water. As the soil crumb begins to hydrate, the tendency for colloidal-sized particles to deflocculate and go into suspension is observed. Results are interpreted at timed intervals, and four grades of reaction are discernible : 1) no reaction; 2) slight reaction; 3) moderate reaction; and 4) strong reaction (colloidal cloud covering the entire bottom of the container) (*) Quite often, the crumb test is done in water with both distilled water and river water for a comparative study.

The crumb test gives a good indication of the potential erodibility of clay soils; however, a dispersive soil may sometimes give a nondispersive reaction in the crumb test. If the crumb test indicates dispersion, the soil is most likely dispersive. The test procedure by the USBR (US Bureau of Reclamation) is fully described in USBR 5400, Procedure for Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Crumb Test Method [26].

(*) There are slightly different descriptions for the Emerson Crumb Test.

3.2.2. Essai SCS au double hydromètre

L'essai de dispersivité SCS, connu aussi sous le nom de l'essai au double hydromètre, est l'une des premières méthodes mises au point pour évaluer la dispersivité des sols argileux. La méthode d'essai actuelle a été mise au point à partir de celle proposée par Volk [4] en 1937.

On détermine d'abord la granulométrie, en utilisant l'essai à l'hydromètre normal, dans lequel l'échantillon de sol est dispersé par forte agitation mécanique dans de l'eau distillée et avec un dispersant chimique. On fait ensuite un même essai à l'hydromètre sur un échantillon identique, mais sans agitation mécanique et sans dispersant chimique. Le « taux de dispersion » est le rapport du pourcentage de fines $< 0,005$ mm dans le second essai au pourcentage obtenu dans le premier essai [26].

Un grand nombre d'essais doit être effectué, car la dispersivité d'un sol peut varier beaucoup sur de courtes distances dans une zone d'emprunt ou dans un remblai à la teneur naturelle en eau. Quand le sol est trop sec, l'essai doit être fait avec une teneur en eau proche de l'optimum Proctor Normal, après exposition du sol à cette teneur en eau pendant une période de 3 à 4 semaines.

Il a été démontré qu'une forte proportion de sols à caractère dispersif avait un taux de dispersion de 30 % ou plus, lorsqu'ils étaient soumis à cette méthode d'essai [1, pp. 104-107, 385].

Une variante est appelée essai au triple hydromètre : 1) essai à l'hydromètre normal avec dispersant et agitation; 2) essai en eau distillée seule; 3) essai avec de l'eau de rivière.

3.2.3. « Pinhole test » (essai du « trou d'épingle »)

Cet essai a été mis au point afin de mesurer directement l'érodabilité d'un sol compacté, à éléments fins; dans cet essai, on fait couler de l'eau à travers un petit trou réalisé dans l'échantillon de sol : l'écoulement par ce « trou d'épingle » simule la fuite à travers une fissure, ou tout autre cheminement concentré, dans le noyau imperméable d'un barrage ou d'un autre ouvrage. Un trou de 1,0 mm de diamètre est percé ou foré à travers un échantillon de sol cylindrique, de 25 mm de longueur et de 35 mm de diamètre. L'eau distillée s'écoule à travers le « trou d'épingle » sous des charges de 50, 180 et 380 mm et l'on note le débit et la turbidité de l'écoulement à la sortie. Les pressions de 50, 180 et 380 mm produisent des vitesses d'écoulement allant approximativement de 30 à 160 cm/s sous des gradients hydrauliques variant approximativement de 2 à 15. Cet essai a été mis au point par Sherard *et al.* [2] et a été un essai physique largement utilisé au cours des dernières années [24, 27, 28]. Il est important que l'essai soit effectué sur un sol à sa teneur en eau naturelle, car la dessiccation peut affecter les résultats pour beaucoup de sols.

Des modifications ont été apportées par l'USBR à la méthode initiale du « pinhole test » ainsi qu'au matériel, à la suite de recherches approfondies en laboratoire et d'un programme d'essais terminé en 1982. Le nouvel essai du « trou d'épingle » donne les mêmes résultats que l'ancien, mais avec une amélioration de la préparation, de la manipulation et du contrôle de l'échantillon, ainsi que de la régularité de l'essai; c'est aussi une méthode quantitative permettant d'identifier les différents degrés d'érodabilité [24]. Les études poursuivies par le Centre d'Études et de Recherches sur les Matériaux et les Sols (Central Soil and Materials Research Station) du Ministère des Ressources en Eau de l'Inde ont montré qu'il y avait un seuil pour les sels dissous dans les sols. La conclusion tirée de l'examen de 174 sols provenant de divers ouvrages est que les sols contenant moins de 0,35 meq/l ne sont pas identifiés comme dispersifs par le « pinhole test », même avec une forte teneur en sodium.

3.2.2. The SCS Double Hydrometer Test

The SCS laboratory dispersion test, also known as the double hydrometer test, is one of the first methods developed to assess dispersion of clay soils. The current test method was developed from a procedure proposed by Volk [4] in 1937.

The particle-size distribution is first determined using the standard hydrometer test in which the soil specimen is dispersed in distilled water with strong mechanical agitation and a chemical dispersant. A parallel hydrometer test is then made on a duplicate soil specimen, but without mechanical agitation and without a chemical dispersant. The “ percent dispersion ” is the ratio of 0.005 mm diameter particles of the second test to the first expressed as a percentage [26].

A large number of tests should be performed as soil dispersiveness can vary greatly over short distances within a borrow area or an embankment at natural moisture content. When the soil is too dry, the test should be performed at close to Standard Proctor optimum after maturing the soil at that moisture for a period of 3 to 4 weeks.

There is evidence that a high percentage of soils with dispersive characteristics showed 30 % dispersion or more when tested by this method [1, pp. 104-107, 385].

A variation is called the triple hydrometer test : 1) normal hydrometer test with dispersant and agitation; 2) test with distilled water only, 3) test with river water.

3.2.3. The Pinhole Test

The pinhole test was developed to directly measure erodibility of compacted fine-grained soils in which water is made to flow through a small hole in a soil specimen where waterflow through the pinhole simulates waterflow through a crack or other structure. A 1.0 mm diameter hole is punched or drilled through a 25 mm long by 35 mm diameter cylindrical soil specimen. Distilled water is percolated through the pinhole under heads of 50, 180, and 380 mm, and the flow rate and effluent turbidity are recorded. The 50, 180 and 380 mm heads result in flow velocities ranging from approximately 30 to 160 cm/s at hydraulic gradients ranging from approximately 2 to 15. The test was developed by Sherard, *et al.* [2] and in the past few years has been a widely used physical test [24, 27, 28]. It is important that the test be made on soil at its natural moisture content, as drying may affect test results for many soils.

Modifications to the original pinhole test procedure and equipment were made by the USBR as a result of extensive laboratory investigations and a field testing program completed in 1982. The new pinhole test produces the same result as the original test, but with improved sample preparation, handling and control, testing consistency, as well as a quantitative method of identifying the different grades of erodibility [24]. Studies by the Central Soil and Materials Research Station, Ministry of Water Resources of India, have shown there appears to be a threshold level of soluble salts in soils. The conclusion drawn from work with 174 soils from various projects is that soils with less than 0.35 meq/l will not be indicated as dispersive by the pinhole test even with a high sodium content.

D'autres essais indirects, comme le « crumb test », le double hydromètre, les analyses de cations dans l'eau interstitielle et de potentiel Zeta, peuvent être aussi utilisés pour aider à identifier les argiles dispersives. Cependant, les résultats de ces différents essais ne sont pas souvent en accord entre eux et le « pinhole test » est considéré comme le plus fiable, parce que c'est un essai physique qui reproduit les conditions réelles et qui évalue l'érodabilité.

On peut de nouveau insister sur le fait que tous les types d'essais doivent être effectués sur chaque échantillon pour avoir l'information la plus complète et l'identification la plus fiable.

3.2.4. Essais chimiques

Au début des années 1960, des chercheurs Australiens découvraient que la présence de sodium échangeable était un facteur chimique important contribuant au comportement dispersif des argiles [5, 22, 29]. Le paramètre fondamental pour mesurer cet effet est :

$$ESP = \frac{\text{Sodium échangeable}}{\text{CEC (Capacité d'Échange des Cations)}} \times 100$$

avec pour unité : meq/100 g de sol sec [6].

Des sols avec des ESP de 10 ou au-dessus, qui sont susceptibles d'avoir des sels libres entraînés par la percolation d'eau relativement pure, sont classés comme dispersifs.

Un autre paramètre couramment utilisé pour mesurer le rôle du sodium dans la dispersion, quand des sels libres sont présents, est le SAR (Sodium Absorption Ratio - taux d'absorption de sodium) de l'eau interstitielle :

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

avec pour unités : meq/l

La méthode SAR n'est pas applicable s'il n'y a pas de sels libres. L'utilisation du SAR est fondée sur l'hypothèse que les sols, dans la nature, sont en équilibre avec leur environnement. En particulier, il y a une corrélation entre la concentration électrolytique de l'eau interstitielle et les ions échangeables de la couche d'argile adsorbée. Cette bonne corrélation a conduit les chercheurs à proposer de remplacer la détermination, plus difficile et plus coûteuse, de l'ESP par une estimation de l'ESP à partir de la valeur du SAR. On a montré que cette corrélation n'était pas nécessairement constante et sûre et qu'elle pouvait être influencée par la nature minérale de l'argile et d'autres facteurs. D'autres recherches approfondies sont nécessaires pour déterminer la fiabilité de la corrélation et les facteurs qui peuvent l'affecter.

Other indirect tests such as the crumb test, double hydrometer, and soil pore water cation, and zeta potential analyses are also used to help identify dispersive clays. However, the results from the individual tests often do not agree, and the pinhole test is considered the most reliable since it is a physical test which models service conditions and assesses erodibility.

It is stressed again that all of the tests should be performed on each soil sample for the most complete information and most reliable identification.

3.2.4. Chemical Tests

During the early 1960's, Australian researchers recognized the presence of exchangeable sodium as a main contributing chemical factor to dispersive clay behavior [5, 22, 29]. The basic parameter to quantify this effect is ESP, where :

$$\text{ESP} = \frac{\text{exchangeable sodium}}{\text{CEC (Cation Exchange Capacity)}} \times 100$$

with units of meq/100 g of dry soil [6]

Soils with ESP of 10 or above which are subject to having free salts leached by seepage of relatively pure water are classified as dispersive.

Another parameter commonly evaluated to quantify the role of sodium with respect to dispersion when free salts are present is the SAR (sodium absorption ratio) of the pore water where :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{0.5 (\text{Ca} + \text{Mg})}}$$

with units of meq/l

The SAR method is not applicable if no free salts are present. Use of the SAR is based on the assumption that soils in nature are in equilibrium with their environment. In particular, there is a relationship between electrolyte concentration of the soil pore water and the exchangeable ions in the clay adsorbed layer. This good relationship has led researchers to postulate that the more difficult and costly ESP determination can be replaced by estimating ESP from the SAR value. It has been shown that this relationship is not necessarily constant and reliable and may be influenced by the type of clay mineral and other factors. Further intensive research is required to determine the reliability of the relationship and the factors affecting it.

Les chercheurs australiens ont montré que tous les sols étaient dispersifs si le SAR était supérieur à 2. Ceci est généralement confirmé pour les sols qui ont un TDS (Total Dissolved Salts - Total de Sels Dissous) compris entre 0,5 et 3 meq/l, mais non pour les sols à l'extérieur de cette marge [40], ainsi qu'on le voit sur la Fig. 1.

La méthode couramment utilisée aux États-Unis pour évaluer l'influence chimique des sols sur le comportement dispersif est représentée sur la Fig. 2.

Afin d'obtenir un extrait saturé, le sol est mélangé à de l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'une pâte de sol saturé avec une teneur en eau proche de la limite de liquidité d'Atterberg. La pâte est laissée au repos pendant plusieurs heures jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint entre les sels de l'eau interstitielle et ceux du complexe de cations échangeables. Ensuite, une petite quantité d'eau interstitielle est extraite de la pâte de sol, par filtrage sous vide. Cet extrait est soumis aux essais chimiques habituels, pour déterminer la quantité des principaux cations métalliques : calcium, magnésium, sodium et potassium, en termes de milliéquivalents par litre. Le pourcentage de sodium et le total de sels dissous (somme des 4 cations métalliques) sont ainsi déterminés.

Bien qu'on ait utilisé les critères indiqués dans la Fig. 2, avec quelques succès aux USA, les analyses statistiques sur 223 échantillons de sols ont montré que, pour les sols particuliers examinés, cette méthode n'était pas toujours en accord avec les résultats du « pinhole test » [28]. Cependant, la Fig. 2 a été utilisée avec succès, comme méthode courante, dans des sites où les études préliminaires avaient montré une bonne corrélation entre cette Figure et le « pinhole test ». D'ailleurs, on peut se servir des essais chimiques avec une certaine confiance quand, pour des sols provenant de la même zone, on utilise conjointement des essais physiques. Il est recommandé que, pour chaque site, les diverses variables de l'eau interstitielle soient évaluées au moyen d'analyses distinctes [28]. Cela doit permettre le choix de la meilleure combinaison de variables, pour un travail donné.

L'utilisation des critères de la Fig. 2 n'a pas été considérée comme suffisamment sûre par des ingénieurs d'Afrique du Sud et du Zimbabwe [40], et une méthode pour évaluer les effets des sels dissous dans l'eau interstitielle sur les possibilités de dispersion a été mise au point, comme indiqué par la Fig. 3 [19].

Ce diagramme montre la méthode à suivre pour déterminer le caractère dispersif des sols, en se servant des mesures chimiques proposées par Harmse [31]. L'échantillon est soumis à une percolation d'eau douce et on suit le diagramme qui indique les essais à faire jusqu'à l'estimation finale.

Les reconnaissances et essais exécutés sur la fondation et les matériaux de remblai pour l'aménagement hydroélectrique de Guri comprenaient des essais courants de laboratoire pour évaluer les caractéristiques dispersives ou non dispersives des sols rencontrés. Les essais effectués en général étaient ceux du « trou d'épingle » (« crumb test ») et au double hydromètre.

Les résultats des essais chimiques furent considérés comme douteux, du fait que, dès le début des essais, l'analyse des sels solubles dans l'eau indiquait un pourcentage de sodium par rapport à l'ensemble des sels dissous, correspondant à la zone de comportement dispersif de l'abaque. Toutefois, les « pinhole tests », les « crumb tests » et les essais au double hydromètre, avec ou sans dispersant, démontraient que les sols en question n'étaient pas dispersifs. Ces résultats indiquaient que la teneur en sel de l'eau interstitielle ne contrôlait pas la nature dispersive des sols résiduels de Guri.

Australian researchers showed that all soils were dispersive if SAR exceeded 2. This shows reasonable agreement for soils with TDS (total dissolved salts) between 0.5 and 3 meq/l but not for soils outside this range [40] as shown in Fig. 1.

The currently accepted method of evaluating the chemical influence on dispersive behaviour in the USA is shown in Fig. 2.

To obtain the saturation extract, soil is mixed with distilled water until a saturated soil paste with moisture content near the Atterberg liquid limit is obtained. The paste is allowed to sit for a number of hours until equilibrium is attained between the salts in the pore water and on the cation exchange complex. Subsequently, a small quantity of pore water is filtered from the soil paste using a vacuum. This extracted pore water is tested using routine chemical tests to determine the amounts of the main metallic cations : calcium, magnesium, sodium and potassium, in terms of milliequivalents per liter. The percent sodium and total dissolved salts (sum of the four metallic cations) are determined.

Although criteria set forth in Fig. 2 have been used with some success in the USA, statistical analyses of data from 223 soil samples have shown that the method does not always agree well with the physical pinhole test results for the specific soils investigated [28]. However, the use of Fig. 2 has been successful as a routine method in locations where preliminary tests show soils from the given area demonstrate a good correlation between the figure and the pinhole test. Further use of the chemical test can then be carried out on soils from the same area with some confidence when pore-water data are used in conjunction with physical tests. It has been recommended that the pore-water discriminating variables be evaluated for each site using a discriminant analysis procedure [28]. This will allow selection of the most successful combinations of variables for the particular job.

Use of Fig. 2 criteria also did not prove to be sufficiently reliable for engineers in South Africa and Zimbabwe [40], and a procedure for evaluating effects of dissolved salts in the pore water on dispersive potential was developed as shown on Fig. 3 [19].

This schematic shows a test procedure to be followed to determine the dispersive character of soils based upon a chemical evaluation proposed by Harmse [31]. The sample is leached by freshwater, and the decision tree is followed performing the indicated tests to the final evaluation.

The investigations performed on the foundation and fill materials for the Guri Hydroelectric Project included, as a routine procedure, laboratory tests to evaluate the dispersive or non-dispersive characteristics of the soils present at Guri. The tests generally performed were the pinhole and the double hydrometer tests.

Chemical tests were found doubtful because during the initial stage of testing water soluble salt analysis showed that some samples from Guri corresponded to the dispersive zone in the percent sodium vs total dissolved salt graph. However, pinhole tests, crumb tests and double hydrometer tests, with and without dispersants, showed that the Guri soil was basically non-dispersive. This indicated that the salt content in the pore water does not control the dispersive nature of the residual soils at Guri.

Le profil du sol de Guri est celui que l'on rencontre couramment dans les climats tropicaux où les températures sont élevées et les pluies abondantes. Le profil résulte de l'altération d'une roche mère acide dans une région bien drainée mais où la nappe phréatique est élevée. Deux zones prédominantes apparaissent souvent sur de tels profils : une croûte rougeâtre constituée par l'accumulation d'hydroxydes de fer et d'aluminium ainsi que de sesquioxydes forme la partie supérieure du terrain de couverture (1 à 6 m), alors que la partie inférieure (jusqu'à 70 m) est constituée de kaolinite et d'halloysite provenant de l'altération de gneiss granitique.

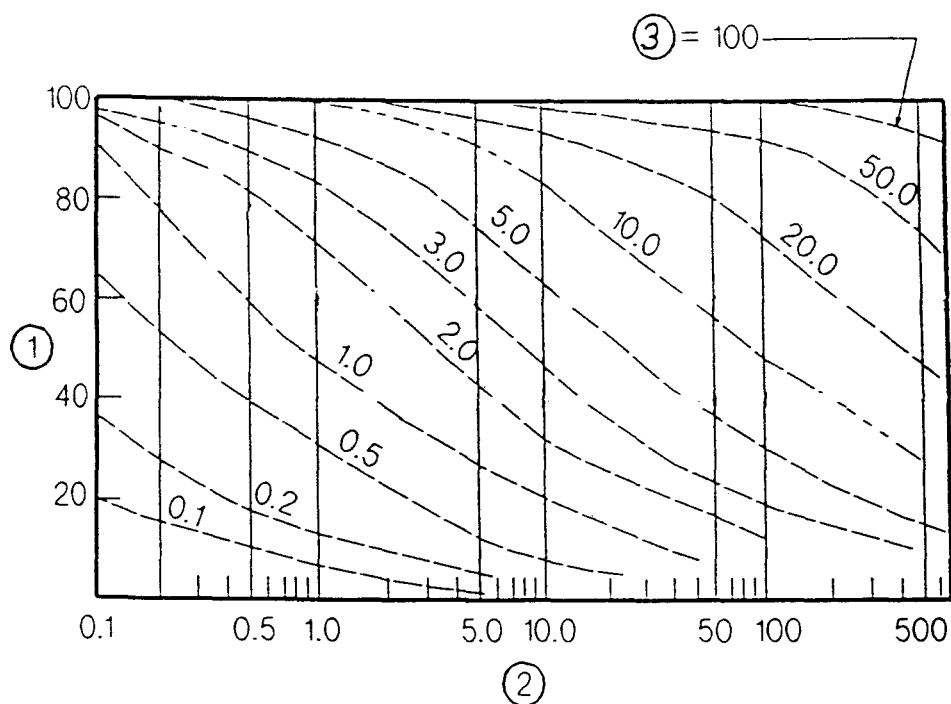


Fig. 1

Potential dispersiveness chart
(After Sherard, et al., [30]).

Abaque de dispersivité potentielle
(d'après Sherard et al. [30]).

(1) Percent sodium

$$= \frac{\text{Na (100)}}{\text{TDS (Total Dissolved Salts)}}$$

(2) Total dissolved salts in saturation extract

$$\text{TDS} = \text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K (meq/l)}.$$

(3) SAR =
$$\frac{\text{Na}}{\sqrt{0.5 (\text{Ca} + \text{Mg})}}$$

with all units in meq/l of saturation extract.

(1) Pourcentage de sodium

$$= \frac{\text{Na (100)}}{\text{Total de sels dissous (TDS)}}$$

(2) Total de sels dissous dans un extrait saturé

$$\text{TDS} = \text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K (meq/l)}.$$

(3) Taux d'absorption de sodium :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{0.5 (\text{Ca} + \text{Mg})}}$$

avec par unités : meq/l dans un extrait saturé.

The soil profile found at Guri is one that is commonly developed in tropical climates with high temperature and rainfall. The profile has resulted from the deep weathering of an acid parent rock, in an area that is well drained but with a permanent high water table. Two predominant zones are displayed often in this type of profile : a reddish crust formed by the accumulation of ferric and aluminous hydroxides and sequioxides in the upper part of the overburden (1 to 6 m) and a lower zone composed of kaolinite and halloysite formed from the alteration of the granitic gneiss (up to 70 m in depth).

The currently accepted method of evaluating the chemical influence on dispersive behaviour in the USA is shown in Fig. 2.

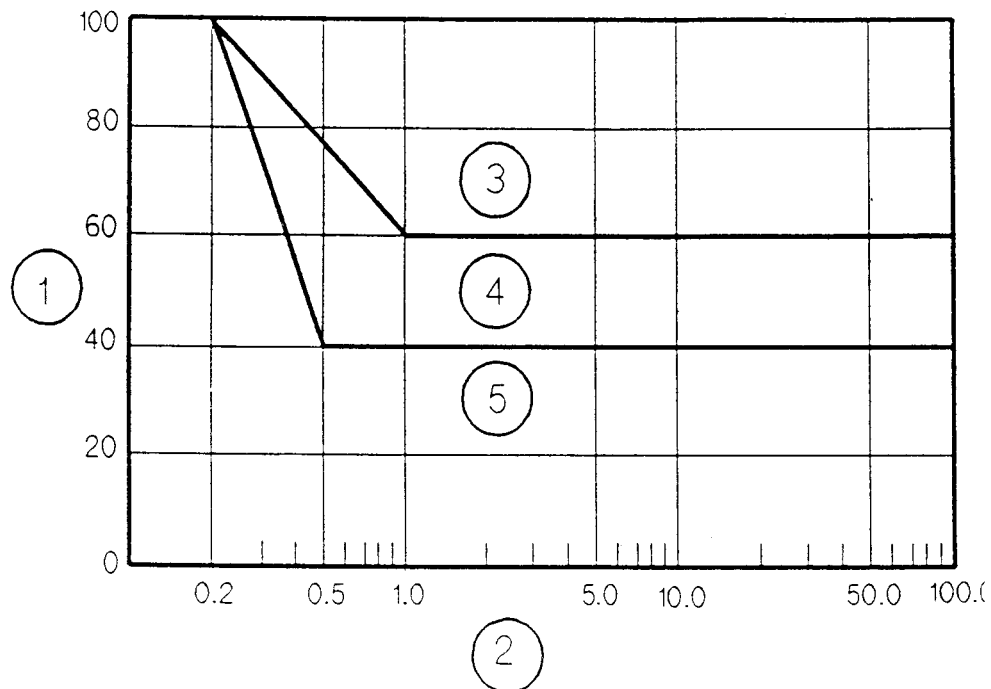


Fig. 2

Potential dispersiveness chart
(After Sherard, *et al.* [30].)

*Abaque de dispersivité potentielle
(d'après Sherard et al. [30]).*

(1) Percent sodium in saturation extract

$$= \frac{\text{Na (100)}}{\text{TDS}}$$

(2) Total dissolved salts in saturation extract

$$\text{TDS} = \text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K (meq/l)}.$$

(3) Dispersive behaviour zone.

(4) Intermediate behaviour zone.

(5) Non-dispersive behaviour zone.

(1) *Pourcentage de sodium dans un extrait saturé*

$$= \frac{\text{Na (100)}}{\text{TDS (Total de sels dissous)}}$$

(2) *Total de sels dissous dans un extrait saturé*

$$\text{TDS} = \text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K (meq/l)}.$$

(3) *Zone de comportement dispersif.*

(4) *Zone de comportement intermédiaire.*

(5) *Zone de comportement non dispersif.*

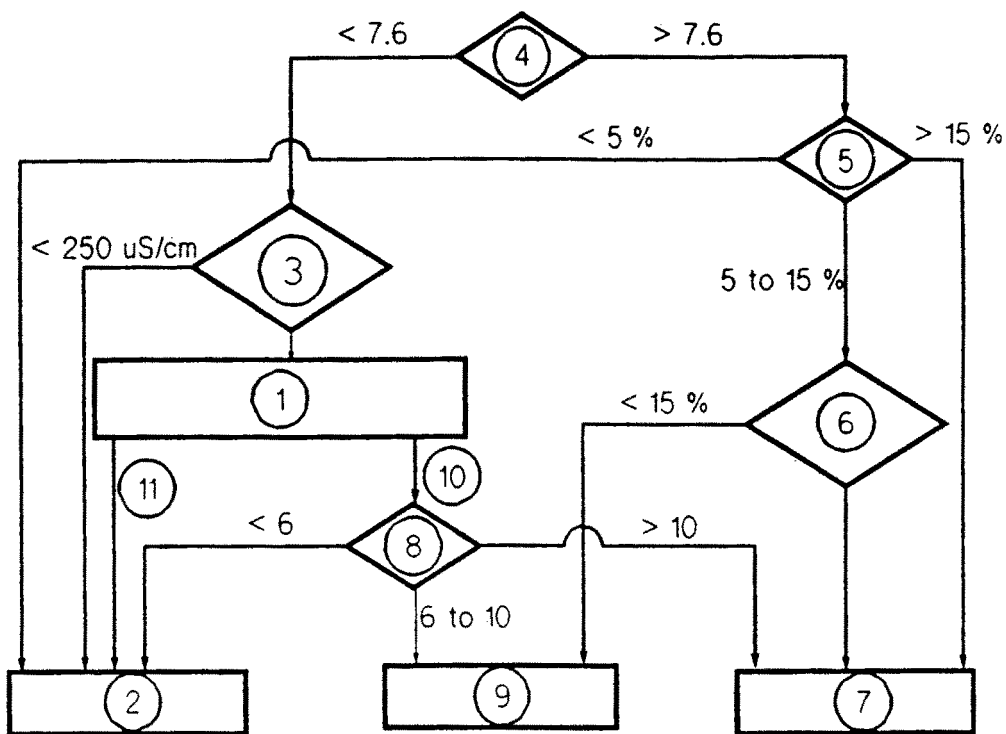


Fig. 3

Chemical evaluation.

Identification par méthode chimique.

- | | |
|--|---|
| (1) Leached by freshwater. | (1) Percolation de l'échantillon par l'eau douce. |
| (2) Nondispersive. | (2) Non dispersif. |
| (3) Conductivity. | (3) Conductivité. |
| (4) pH. | (4) pH. |
| (5) ESP (Exchangeable Sodium Percent). | (5) ESP (pourcentage de sodium échangeable). |
| (6) ESP, EMgP (Exchangeable Mg Percent). | (6) ESP, EMgP (pourcentage de magnésium échangeable). |
| (7) Dispersive. | (7) Dispersif. |
| (8) SAR (Sodium Absorption Ratio). | (8) SAR (taux d'absorption de sodium). |
| (9) Intermediate. | (9) Intermédiaire. |
| (10) Yes. | (10) Oui. |
| (11) No. | (11) Non. |

4. CONSIDÉRATIONS RELATIVES AUX ÉTUDES ET A LA CONSTRUCTION

4.1. PREMIÈRE IDENTIFICATION

Dans beaucoup de ruptures de barrages en remblai causées par des argiles dispersives, la rupture était la première indication de l'existence d'argiles dispersives sur le site. Ceci révèle l'importance d'une reconnaissance et d'une identification précoces des sols comportant des argiles dispersives. Les problèmes qu'elles posent peuvent donner lieu à une suite d'événements soudains, irréversibles et catastrophiques, conduisant à une rupture totale ou partielle. Pour éviter d'avoir plus tard des problèmes sérieux et pour utiliser au mieux les matériaux disponibles, il convient d'examiner toujours, dans tous les programmes de reconnaissances géotechniques, la possibilité de présence de sols dispersifs. Ceci est particulièrement vrai si l'on est en présence d'argiles alluviales ou de dépôts marins et lorsque la surface présente les caractères indiqués précédemment. Lorsque l'on trouve des sols dispersifs pendant la phase de recherche des matériaux, il faut prendre la décision, soit de rechercher d'autres matériaux, soit de prendre des mesures techniques pour faire face aux propriétés dispersives. Cette décision doit être prise en fonction de la dimension, de l'importance et des risques de l'ouvrage. Dans le cas d'un ouvrage à haut risque, qui, en cas de rupture, pourrait causer des pertes de vies humaines, etc., l'usage de matériaux dispersifs ne doit être fait qu'avec un soin extrême en employant toutes les mesures spéciales décrites dans ce Bulletin.

Si les caractéristiques qui ont été examinées permettent généralement d'identifier des sols dispersifs, il peut arriver que des sols présentant ces caractéristiques ne soient pas du tout dispersifs. L'argile marine consolidée, très sensible, du barrage Outardes 2 (argile Champlain du bas Saint-Laurent, Canada) est dans ce cas [45].

Pour ces argiles, le ESP varie de 12 à 60, tandis que le SAR est compris entre 9 et 40. La teneur en sodium est supérieure à 70 %. Tous ces paramètres indiquent une argile très dispersive. Des indices semblables sont également donnés par les autres essais d'identification : l'essai de dispersion SCS indique des valeurs de 40 à 60 % pour l'argile altérée (de la couche supérieure) et de 63 à 100 % pour l'argile intacte (de la couche inférieure). Des « pinhole tests », faits sur des échantillons intacts et remodelés (recompactés), ont donné les résultats suivants : *a*) argile intacte : de forte dispersivité (D_1) à dispersivité nulle (ND_1), *b*) argile remodelée (recompactée) : forte dispersivité (D_1), sensibilité due parfois au remodelage de la paroi du trou d'épingle et non à la dispersivité.

Bien que les essais de laboratoire coïncident pour indiquer que l'argile d'Outardes 2 est un matériau dispersif, les reconnaissances *in situ* entreprises pour détecter des signes d'érosion, de renard, etc., n'ont pas trouvé d'érosions colloïdales de ces argiles. Cette anomalie peut s'expliquer par la nature particulière et la minéralogie de cette argile glaciaire. Ces argiles sont caractérisées par une structure floclée, les particules étant liées ensemble par une cimentation qui a eu lieu pendant la formation des dépôts. D'un point de vue minéralogique, ce sol est naturellement éloigné d'une vraie argile et ressemble plutôt à un silt fin : plus de 90 % de ce

4. ENGINEERING CONSIDERATIONS

4.1. EARLY IDENTIFICATION

In many failures of fill dams caused by dispersive clays, failure of the dam was the first indication of the existence of dispersive clays in the area. This points to the importance of early recognition and identification of dispersive clay soils. The problems they cause can result in a sudden, irreversible, and catastrophic course of events leading to failure or near failure. To avoid later serious problems and to properly utilize available earth construction materials, the possible existence of dispersive soils always should be considered in any geotechnical investigation program. This is especially true where the presence of alluvial clays, marine deposits, and surface evidence described earlier exist. When dispersive soils are found during the materials exploration phase, decisions can be made to look for alternate materials or proceed with necessary engineering design provisions to deal with the dispersive properties. This decision must be based on the relative size, importance, and hazard of the project. In the case of a high hazard project which could result in a failure causing loss of life, etc., the use of a dispersive material should be done with extreme care by providing all special measures described in this Bulletin.

While the characteristics which have been discussed generally allow identifying the presence of dispersive soils, some soils exhibiting those characteristics are, however, not at all dispersive. The highly sensitive cemented marine clay of Outardes 2 Dam (Champlain clay of the St Lawrence lowlands, Canada) is such a case [45].

For those clays, the ESP varies between 12 and 60, while the SAR is situated between 9 and 40. The sodium percentage is also higher than 70 %. All these parameters point out to a highly dispersive clay. Similar indications are also given by the other identification tests : The SCS dispersion test gives values of 40 to 60 % for the weathered clay (upper layer) and 63 to 100 % for the unaltered clay (lower layer). Pinhole tests carried out on undisturbed and remolded (recompacted) samples have shown *a*) undisturbed clay : highly dispersive (D_1) to nondispersive (ND_1), *b*) remolded (recompacted) clay : highly dispersive (D_1), sometimes such sensitivity is due to remolding of the wall of the pinhole and not due to dispersivity.

Although the laboratory tests concur to indicate that the Outardes 2 clay is a dispersive material, field investigations directed to detecting signs of erosion, piping, etc., failed to substantiate any colloidal erosion of this clay. This discrepancy may possibly be explained as being due to the particular nature and mineralogy of this glacial clay. These clays are characterized by a flocculated structure, the particles being bonded together by cementation bonds which developed during the deposit's formation. Mineralogically, of course, this soil is far from a true clay and more like a fine silt; more than 90 % of the material consists of inert minerals (quartz, feldspars,

matériau est constitué de minéraux inertes (quartz, feldspath, amphibole, etc.), et seulement 6 à 8 % sont des minéraux véritables de l'argile (silicate en feuillets) de bas indice CEC. Puisque les deux argiles d'Outardes 2 montrent des teneurs en cations de l'eau interstitielle tout à fait différentes, malgré une composition minéralogique presque identique, cela montre que la composition chimique de l'eau interstitielle est indépendante de la minéralogie et résulte des conditions locales pendant la formation du dépôt.

Il est donc difficile de considérer que le mécanisme d'érosion colloïdale pour les argiles d'Outardes 2 ressemble à celui des argiles dispersives, c'est-à-dire, le détachement progressif des particules d'argile et leur inclusion dans une suspension colloïdale.

Le remodelage de l'argile, par suite de sa sensibilité et de sa haute teneur en eau, la transforme en un matériau de consistance liquide, facilement transporté même par un faible écoulement. Cette caractéristique de l'argile d'Outardes 2 pourrait expliquer le comportement de ce matériau au cours des « pinhole tests ». On peut admettre que, pendant l'insertion de l'épingle dans l'échantillon, l'argile est remodelée autour du trou, la paroi du trou étant quelque peu liquéfiée. Durant l'essai, qui dure seulement 10 à 15 minutes, il est probable que ce matériau liquéfié est lessivé, causant la turbidité de l'eau évacuée et une augmentation du diamètre du trou, laissant supposer une érodabilité de l'argile. Par la suite, des échantillons non remaniés ont été soumis au « pinhole test » sous des gradients hydrauliques de 3,5 à 7 (charges de 18 et 38 cm). Après 8 minutes sous la charge de 18 cm, un débit de 0,4 à 0,5 cm³/s, d'eau trouble, caractéristique des argiles dispersives, fut enregistré. Ce débit a augmenté jusqu'à 0,7-0,75 cm³/s dans les 160 à 180 minutes suivantes et l'eau est devenue plus claire. Après environ 300 minutes (5 heures) l'eau était complètement claire et le débit restait stable. L'augmentation de la charge à 38 cm était accompagnée d'un accroissement de débit à 1,20-1,25 cm³/s; cependant l'eau restait claire même après 360 minutes (6 heures) d'écoulement. Il semble bien, par conséquent, qu'une fois que l'argile modifiée et peut-être liquéfiée (par suite de l'introduction de l'épingle) a été emportée, il n'y a plus d'érosion ou de dispersion, même sous des gradients hydrauliques élevés.

4.2. CHOIX DES MATÉRIAUX POUR UNE CONSTRUCTION ÉCONOMIQUE

Un cas particulier se présente pour des situations à faible risque, lorsque les matériaux habituellement recommandés ne sont pas facilement disponibles. Dans la recherche de matériaux de construction utilisables à un coût raisonnable, les sols dispersifs peuvent offrir le meilleur choix efficacité-prix. Le souci de limiter l'emploi de ces matériaux et les problèmes qu'ils peuvent causer doivent être évalués en fonction des risques potentiels, dans chaque cas particulier. Bien que les sols dispersifs demandent des mesures spéciales quand ils sont utilisés dans des barrages en remblai, ils peuvent représenter la solution la plus économique pour des situations à faible risque.

4.3. MESURES A ADOPTER DANS LES ÉTUDES ET LA CONSTRUCTION

Parmi les nombreuses ruptures dues à des argiles dispersives, la presque totalité est survenue sur des barrages homogènes ne comportant pas de filtres et tous les renards dus à la dispersivité ont été causés par un chemin initial d'écoulement concentré, à travers le remblai.

amphibole, etc.), and only a maximum of 6 to 8 % are genuine clay minerals (layered silicates) of low CEC. Because the two Outardes 2 clays exhibit quite different dissolved cation contents of their pore water despite their essentially identical mineralogical composition, it is felt that the chemistry of the pore waters is independent of their mineralogy and results from environmental conditions during the formation of the deposit.

It is difficult, therefore, to consider the mechanism of colloidal erosion for the Outardes 2 clays as conceived for the dispersive clays, that is, the progressive detachment of the clay particles and their subsequent inclusion into a colloidal suspension.

Due to its sensitivity and high water content, remolding the clay transforms it to a material of liquid consistency, easily carried away by even a weak flow. This characteristic of the Outardes 2 clay might possibly explain the behavior of the material during pinhole tests. It can be assumed that, during the insertion of the pin in the specimen, the clay is remolded around the hole, with the hole's wall being somewhat liquefied. During the test, which lasts only 10 to 15 minutes, it is probable that this liquefied material is washed away, thereby causing a turbidity of the discharge water and an increase in the diameter of the hole, to point to the erodibility of the clay. To this end, samples of undisturbed specimens were submitted to pinhole tests under hydraulic gradients of 3.5 to 7.0 (heads of 7 and 15 inches). After 8 minutes under a head of 7 inches, a discharge of 0.4 to 0.5 cm³/s of turbid water, characteristic of dispersive clays, was recorded. The discharge increased to 0.7 to 0.75 cm³/s in the next 160 to 180 minutes, and the water became clearer. After about 300 minutes (5 hours), the water was completely clear, while the discharge remained stable. The increase of the hydraulic head to 15 inches was accompanied by a rise of the discharge to 1.20 to 1.25 cm³/s; however, the water remained clear even after another 360 minutes (6 hours) of flow. It seems, consequently, that once the disturbed and eventually liquefied clay (produced by the insertion of the pin) is washed away, no subsequent erosion or dispersion takes place, even under severe hydraulic gradients.

4.2. SELECTION OF MATERIALS FOR ECONOMIC CONSTRUCTION

Low-hazard situations where preferred construction materials are not readily available present a special case. In searching for construction materials available at reasonable cost, dispersive soils may offer the most cost-effective choice. The concern for the limitations of these materials and the problems they may cause should be evaluated in terms of the potential hazard in the specific case. Although dispersive soils require special provisions when used in earth fill dams, these materials may represent the most economic choice of materials for specific low-hazard situation.

4.3. DESIGN AND CONSTRUCTION MEASURES

Almost all of the considerable number of failures due to dispersive clay have occurred in homogeneous dams without filters, and all dispersive piping failures were caused by an initial concentrated seepage path through the embankment.

De plus, il y a lieu d'apporter une attention spéciale et un traitement particulier à toutes les zones pouvant être médiocrement compactées et, de ce fait, avoir une forte perméabilité : autour des conduits qui traversent le remblai, à proximité des ouvrages en béton et des appuis escarpés, au contact avec la fondation... Donc, si on veut éviter des renards causés par la défloculation, il est très important de contrôler le compactage et la densité des matériaux. Une perméabilité inférieure à 10^{-7} m/s doit être obtenue. Ceci nécessite un contrôle soigné du compactage et de la teneur en eau pendant la construction, pour optimiser ces conditions.

Les mesures suivantes peuvent être adoptées :

1 - Exercer un contrôle méticuleux de la construction.

2 - Augmenter la déformabilité du sol compacté *en maintenant la teneur en eau à la mise en place au-dessus de l'optimum*. Une teneur en eau faible à la mise en place permet la formation initiale d'une structure floculeuse très sujette à la défloculation et au lessivage des sels quand elle est exposée à une percolation d'eau. A teneur en eau plus élevée, la déformabilité du sol améliore aussi la résistance à la fissuration. Un sol compacté par couches peu épaisses en utilisant des rouleaux pneumatiques, etc., permet d'obtenir une densité élevée et améliore les contacts avec les ouvrages ou le rocher de fondation.

3 - Choisir le meilleur intervalle de temps entre la mise en place de deux couches successives pour *éliminer la possibilité de formation de microfissures par suite de dessiccation, particulièrement en climat tropical*.

4 - Observer attentivement la surface compactée pour y détecter la formation de fissures, et prendre les mesures appropriées pour la prévention de ces fissures ou la correction de la teneur en eau.

5 - *Régler préalablement la teneur en eau du sol, dans la zone d'emprunts, par submersion, irrigation, etc.*

6 - Éviter l'humidification, sur le remblai, utilisant un écoulement d'eau concentré.

7 - Éviter, par une exploitation convenable de la zone d'emprunts, d'avoir des matériaux contenant trop de gros sable ou de gravier et pas assez d'argile.

8 - L'examen visuel par des contrôleurs expérimentés et des mesures de compression fréquentes sont toujours très bénéfiques. Augmenter la fréquence des essais de contrôle de la densité et de la teneur en eau. Une période de maturation de 3 à 4 semaines, dépendant du type et de la teneur en eau du sol, peut être nécessaire.

9 - Fermer complètement les fissures de surface dans la roche de fondation par un traitement approprié (coulis d'injection).

10 - Établir une couche continue de béton, si le rocher contient beaucoup de fissures.

11 - Disposer des masques en forme de colliers autour des conduites et traiter la surface avec un coulis avant de déposer les matériaux; ou se servir d'un engin capable de tasser sur des fruits (horizontale/verticale) de 10 à 15 %; et, en même temps, disposer des filtres entourant la partie aval des conduites.

12 - Examiner la possibilité économique de placer des matériaux non dispersifs, ou des matériaux dispersifs traités à la chaux, aux emplacements suivants :

a) dans les zones d'écoulements concentrés, par exemple autour des conduites de vidange;

Additionally, areas of potentially lower soil compaction and resulting high soil permeability such as around conduits through the embankment, adjacent to concrete structures and steep abutments, and at the foundation interface all require special treatment and attention during construction. Therefore, compaction and density control are most important if piping due to deflocculation is to be avoided. A permeability of less than 10^{-7} m/s should be achieved. This requires careful control of compaction and moisture content during construction to optimize these conditions.

The following measures can be considered :

- 1 - Exercise meticulous construction control.
 - 2 - Improve flexibility of compacted soil *keeping placement moisture above OMC (optimum moisture content)*. Low placement moisture content permits formation of an initial flocculent structure highly susceptible to deflocculation and leaching of salts when exposed to water percolation. At higher moisture contents, the flexibility of the soil also improves to resist cracking. Compact soil in thinner layers using pneumatic tampers, etc., obtains a high degree of density and bond with structure/foundation rock.
 - 3 - Optimize interval of placement time of successive layers *to eliminate possibility of formation of microcracks due to desiccation, particularly in tropical climates*.
 - 4 - Closely observe compacted surface for crack formation and take measures for prevention/correction of moisture by appropriate methods.
 - 5 - *Precondition soil moisture in borrow areas by ponding, preirrigation, etc.*
 - 6 - Avoid addition of moisture on the embankment using concentrated flow.
 - 7 - Avoid, by proper management of borrow area, soils containing excess amount of coarse sand and gravel fractions with less clay fractions.
 - 8 - Visual inspection by experienced inspectors and frequent unconfined compression tests will prove very beneficial. Increase frequency of density and moisture control tests. A maturity period of 3 to 4 weeks, depending on soil type and its natural moisture content, may be required.
 - 9 - Effectively seal surface cracks in foundation rock by slush grouting.
 - 10 - Provide continuous concrete pads where rocks contain several cracks.
 - 11 - Provide external cutoff collars for conduit structures and slush grout surface before placement of soils or provide a batter, horizontal to vertical (10 to 15 %) together with a filter surrounding the downstream part of the conduit.
 - 12 - Examine economic feasibility of selective placement of nondispersive/lime treated dispersive soil at the following locations :
 - a) At concentrated flows, as at around outlet conduits.
-

- b) aux contacts avec le rocher de fondation et avec les ouvrages rigides;
- c) aux emplacements où l'on peut craindre des contraintes de tension et des fissurations;
- d) dans la zone aval du noyau d'argile juste en amont des zones de filtre aval.

13 - Surveiller attentivement le comportement du barrage après le remplissage de la retenue.

Des filtres convenablement étudiés peuvent maîtriser les fuites avec efficacité et sûreté, que le remblai ait été construit en sol dispersif ou non. Dans les sols dispersifs, le filtre ne peut arrêter le passage des particules colloïdales en suspension dans une fuite, mais les particules silteuses ne peuvent entrer dans le filtre et sont retenues en amont du filtre : elles colmatent progressivement la fuite. Avec des sols non dispersifs, on définit le filtre de façon que les particules fines d'une zone à protéger ne puissent entrer dans le filtre. Cependant, la défectuosité de certains filtres, causée par un mécanisme d'autofiltration apparemment inopérant, a été observée surtout dans des sols cohésifs non dispersifs, dans lesquels des fissures ont pu exister (Sherard, 1979) [42]. Si ceci a pu exister avec des sols cohésifs non dispersifs, dans le cas des sols cohésifs dispersifs, qui manquent de stabilité interne et sont sensibles à la suffusion, on ne peut guère s'attendre au développement d'un mécanisme d'autofiltration. Ce mécanisme est différent dans ces deux types d'argile. Un sol non cohésif saturé possède des caractéristiques d'auto-étanchement vis-à-vis d'une fissure ouverte. Par contre, dans les sols cohésifs, les débris d'érosion peuvent être sujets à ségrégation (Vaughan et Soares, 1982) [43], et l'autofiltration ne se développe pas toujours. Les sols dispersifs rendent le problème encore plus difficile. C'est pourquoi une attention particulière doit être portée à la conception des filtres pour assurer la protection des sols cohésifs contre l'érosion interne, en cas de fissures ouvertes traversées par des percolations d'eau. Le phénomène de suffusion doit être étudié compte tenu de la présence ou de l'absence des différentes dimensions des grains et de la possibilité de migration des éléments fins à l'interface du filtre. Si les éléments fins passent à travers les pores du filtre, le blocage du filtre peut survenir et, si les éléments fins sont arrêtés par le filtre, ce dernier peut perdre de son efficacité.

D'après ce qui précède, Sherard *et al.* [32, 33] ont établi que les filtres en sable ou sable graveleux, avec $D_{15} (*) \leq 0,5$ mm, maîtriseront avec sûreté et étancheront les fuites concentrées à travers les argiles les plus dispersives avec $d_{85} (*) > 0,03$ mm environ. Les filtres avec un sable de $D_{15} \leq 0,2$ mm sont efficaces pour les argiles dispersives les plus fines. Les filtres nécessaires sont les mêmes pour des argiles, dispersives ou non dispersives, ayant la même granulométrie.

Le filtre, pour être efficace quand des fissures se forment, doit être non cohésif. S'il est cohésif, il peut lui-même comporter des fissures ouvertes et ne pas protéger le noyau fissuré.

Des recherches actuellement poursuivies par le Département des Aménagements Hydrauliques, en Afrique du Sud, ont montré qu'il était nécessaire de faire des essais complets, reproduisant les conditions d'application d'un géotextile avec le sol employé dans l'ouvrage. Ces essais indiquent que les critères de projet publiés ne sont pas utilisables, et que les interactions réelles entre sol et géotextile doivent être étudiées pour chaque application. Ceci semble être une démarche prudente avant d'utiliser des géotextiles avec des matériaux dispersifs, dans des barrages en remblai.

(*) D_{15} = Dimension des particules d'un filtre, dont 15 % sont plus petites (% en poids de sol sec).

(*) d_{85} = Dimension des particules d'un sol, dont 85 % sont plus petites (% en poids de sol sec).

- b) Contact surface of rock foundation and rigid structures.
 - c) Zones where tensile stresses and cracking are expected.
 - d) Downstream zone of a clay core, immediately upstream of the downstream filter zones.
- 13 - Closely monitor performance after filling of dam.

Properly designed filters can effectively and safely control leaks in embankments whether they are constructed of dispersive or nondispersive soil. In sealing and filtering a leak in dispersive soil, the filter cannot stop the colloidal particles in suspension from passing through, but the silt-size particles carried by the flow cannot enter the filter and are retained in the leakage channel upstream of the filter and gradually seal the leak. With nondispersive soils, the filter is designed to prevent fine particles in a protected zone from entering the filter. However, filter failure in dams due to apparent breakdown of self-filtering mechanism has been observed predominantly even in nondispersive cohesive soils in which cracks may well have been present (Sherard, 1979) [42]. While this being the case with nondispersive cohesive soils, in the case of the dispersive cohesive soils which lack internal stability and are amenable for suffusion, one cannot always expect development of the self-filtering mechanism. The mechanism of self filtering, etc., is different for these two types of clays. A saturated noncohesive soil possesses self-sealing characteristics with regard to open cracks. While in the cohesive base soil, the erosion debris may be subject to segregation (Vaughan & Soares, 1982) [43], and self filtering cannot be necessarily relied on. Dispersive soil conditions make the problem more severe. Therefore, caution is required in the design of filters to ensure the protection of cohesive soils against internal erosion where they may contain open cracks with continuous flow of water through them. The phenomena of suffusion need to be studied with reference to the absence or presence of the various grain sizes and the possibility of migration of fines to the filter interface. If the fines are passed through the filter pores, blocking of filter may occur, and if the fines are arrested by the filter, decrease in efficiency of the filter may occur.

Based on the above, Sherard, *et al.* [32, 33] state that sand or gravelly sand filters with $D_{15} (*) = 0.5$ mm or smaller will safely control and seal concentrated leaks through most dispersive clays with $d_{85} (*)$ larger than about 0.03 mm. Sand filters with $D_{15} = 0.2$ mm or smaller are conservative for the very finest dispersive clays. For clays having similar particle size distribution, whether dispersive or nondispersive, the required filters are the same.

The filter, to be effective when cracks form, should be noncohesive. If it is not, it may itself sustain an open crack and fail to protect the cracked core.

Applied research currently being carried out by the Department of Water Affairs in South Africa has indicated that extensive tests need to be carried out simulating the proposed application of the geotextile with the soil to be used in the structure. Their tests indicate that the published design criteria cannot be used, and the actual soil/geotextile interaction must be tested for the proposed field application. This would seem to be a prudent step for use of geotextiles with dispersive materials in embankment dams.

(*) D_{15} = Particle size in filter of which 15 % are smaller, by dry mass of soil.

(*) d_{85} = Particle size of base soil of which 85 % are smaller, by dry mass of soil.

Une attention spéciale doit être portée aux barrages dont les noyaux en sols dispersifs sont fondés au rocher, pour éviter que l'argile ne pénètre dans les petites fissures de la roche. Le meilleur procédé consiste à nettoyer les fissures principales à une profondeur minimale de 3 fois leur largeur, et de les remplir avec un mortier de ciment, avant de mettre une couche d'enduit terreux sur la surface du contact noyau-rocher. Une argile dispersive modifiée [10] par de la chaux hydratée, ou une argile non dispersive de plasticité moyenne à forte, peut aussi être utilisée à cette fin, suivant les conditions locales [1, 34, 35, 36]. Cependant, on doit garder présent à l'esprit que le mélange homogène de petites quantités de chaux, ou d'un autre sol non dispersif, avec des argiles dispersives à l'état naturel est problématique et peut se révéler, dans certaines circonstances, non économique et inefficace. En outre, le mélange de chaux, qui par ailleurs introduit fragilité et fissuration, produit une dislocation susceptible d'entraîner, en climat tropical, des fissures de retrait dans la masse du sol.

On doit exercer une grande attention en compactant le sol en contact avec des ouvrages rigides, comme les conduites. Dans quelques cas, on a utilisé de l'argile dispersive traitée à la chaux pour des parties de ces zones de contact. L'argile dispersive traitée à la chaux peut être nécessaire pour la protection des parements, si d'autres moyens, tels qu'une couche de matériaux grossiers associée à des filtres, ne sont pas réalisables économiquement.

Barrages réalisés en argile dispersive

Il y a de nombreux petits barrages homogènes en argile dispersive, à travers le monde, qui se comportent de façon satisfaisante depuis de nombreuses années. C'est ce qu'il faut conclure de la connaissance récente de grandes zones géographiques dans le monde, où il existe des argiles dispersives. Il est très peu probable qu'un barrage-réservoir, ne présentant déjà aucune fuite, puisse développer, dans des conditions normales d'exploitation, des percolations concentrées. Dans le cas des grands barrages avec d'importantes retenues, et en particulier s'ils comportent des filtres, on a conclu en général qu'il n'y avait pas de raison de les considérer comme non satisfaisants dans des conditions normales, surtout s'ils ne présentent pas de fuites depuis plusieurs années.

Lorsque des barrages en argile dispersive ont connu des défaillances, par suite de renards, et ont été réparés ou reconstruits, on a souvent utilisé le sol traité à la chaux pour combler la brèche ou comme protection du parement [1, 17, 37]. Cependant, tous les sols dispersifs ne peuvent être modifiés ou stabilisés par la chaux. Dans certains cas, on peut utiliser le gypse et, dans d'autres cas, il faut employer le sulfate d'aluminium [23, 31, 36, 37]. Quand on utilise des sols dispersifs, il faut les recouvrir par des argiles non dispersives et ne pas les exposer à l'atmosphère.

Special consideration must be given to dams with dispersive soil cores on rock foundations to prevent the clay from penetrating small rock cracks. This is best addressed by cleaning the major cracks to a minimum depth of three times their width and by filling the cracks with cement mortar before slush grouting the core-rock contact. Dispersive clay modified [10] with hydrated lime or a nondispersive clay of medium-to-high plasticity can also be utilized for this purpose, depending upon the circumstance [1, 34, 35, 36]. However, it may be kept in mind that homogeneous mixing of small quantities of lime or another nondispersive soil with dispersive clay soils in natural state is problematic and may prove uneconomical and ineffective depending on specific site condition. Also, mixing lime, besides introducing brittleness and cracking, disrupts work which in tropical climates introduces shrinkage cracks in the soil mass.

Great care should be exercised when compacting soil adjacent to rigid structures such as conduits. In some cases, lime-modified dispersive clay has been used for portions of this interface. Lime modification of dispersive clay may be necessary for slope protection where other means such as gravel with the necessary filter layers are not economically feasible.

Existing Dams of Dispersive Clay

There exists many small homogeneous dams of dispersive clay throughout the world which have functioned well for many years. This can be concluded from recent awareness of dispersive clays existing in large geographical areas worldwide. It is highly unlikely that a dam that has retained a reservoir with no leaks will develop a concentrated leak under ordinary conditions of reservoir operation. In the case of large dams retaining important reservoirs, especially if constructed with filters, it has generally been concluded there is no reason to consider them unsatisfactory under normal conditions, especially if no leaks were present for several years.

In situations where dams of dispersive clay have failed by piping and were repaired or rebuilt, lime-modified soil has often been used in repairing the breach and as slope protection [1, 17, 37]. However, not all dispersive soils can be modified or stabilized with lime. In some cases, gypsum can be used, while in others, aluminum sulphate must be used [23, 31, 36, 37]. Dispersive clays, when used, should have some cover of nondispersive clays and should not be exposed to atmosphere.

5. RÉSUMÉ

Les argiles dispersives présentent les propriétés particulières de défloculer, d'être rapidement érodées et d'être entraînées par des écoulements d'eau. Ces propriétés peuvent avoir des conséquences désastreuses sur les barrages en terre construits avec de tels matériaux. Cependant, on dispose maintenant de nombreuses connaissances sur la présence, les propriétés et les essais d'identification des argiles dispersives, ainsi que sur leur utilisation dans les barrages en terre. Les caractéristiques des argiles dispersives et les essais dont elles font l'objet sont résumés dans le tableau ci-après.

Tableau : Résumé des caractéristiques des argiles dispersives et des argiles non dispersives

Essais - Caractéristiques	Qualité dispersive
Silt non cohésif, farine de roche, sables fins.	Dispersif dans l'eau; très érodable; ce n'est pas une argile dispersive.
Pierre argileuse, schistes sous forme de dépôts marins.	Peut être dispersif.
Sols argileux rouges, bruns, gris, jaunes, ou combinaisons.	Peut être une argile dispersive.
Sols organiques noirs; sols à granulométrie fine résultant de l'altération <i>in situ</i> de roches ignées et métamorphiques; sols provenant de calcaire (sauf granites et granodiorites).	C'est probablement une argile non dispersive.
Formes d'érosion inhabituelles avec conduits, ravissements profonds, turbidité excessive de l'eau de la retenue. Faible fertilité et croissance rabougrie résultant de sols salins.	Présence possible d'argiles dispersives.
Essais d'identification <i>in situ</i> : crumb test (essai sur une « miette »), drop test (essai « à la goutte »), essai à l'ultraviolet, essai de turbidité.	Indiquent la présence possible d'argiles dispersives.
Essai courants de laboratoire : crumb test (essai sur une « miette »)	Bonne indication de l'érodabilité potentielle.
essai SCS ou au double hydromètre;	Sols probablement dispersifs.
pinhole test (essai du « trou d'épingle »);	Essai physique direct du caractère dispersif.
essais chimiques.	Indications de sols dispersifs.

Dans l'état actuel des connaissances sur les argiles dispersives, on estime que d'importants changements ne sont pas nécessaires dans les pratiques habituelles de conception et de construction des barrages en terre [1, 38]. Cependant, il est important que l'ingénieur chargé d'un projet soit capable d'identifier les argiles dispersives, de façon qu'une attention et un soin particuliers soient apportés au

5. SUMMARY

Dispersive clays are those with unique properties which under certain conditions deflocculate and are rapidly eroded and carried away by waterflow. These properties have and can result in disastrous consequences for earthfill dams constructed with these materials. However, much is now known about the presence, properties, and tests for identification of dispersive clays and for their use in earthfill dams. The characteristics of dispersive clays and related tests are summarized in the following Table.

Table : Summary of Characteristics of Nondispersive vs. Dispersive Clays

Test - Characteristics	Dispersive quality
Noncohesive silt, rock flour, fine sands	Dispersive in water; highly erosive; not a dispersive clay.
Clay stone, and shales laid down as marine deposits.	May be dispersive.
Red, brown, gray, yellow-clay soils or combinations.	May be dispersive clay.
Black, organic soils; fine-grained soils derived from <i>in situ</i> weathering of igneous and metamorphic rocks; and soils derived from limestone (except for granites and granodiorites).	Likely to be non-dispersive clay.
Unusual erosional patterns with tunnels, deep gullies, with excessive turbidity in storage water. Poor crop production and stunted growth from saline soils.	Indications of possible presence of dispersive clays.
Field identification tests : crumb test, drop test, UV test, turbidity test.	Show indications of possible presence of dispersive clays.
Common laboratory tests :	
Laboratory crumb test;	Good indication of potential erodibility.
SCS double hydrometer test;	Soils likely to be dispersive.
Pinhole test;	Direct physical test of dispersive character.
Chemical tests.	Indications of dispersive soils.

With the present state of knowledge of dispersive clays, it is believed that no important changes are necessary in current practice for designing and constructing earth embankment dams [1, 38]. However, it is important for the engineer to be able to identify dispersive clays on a given project so that special care and attention can be given during design and construction to the critical areas in the dam in which

projet et à la construction, dans les zones critiques du barrage où ces argiles sont utilisées. Des études récentes sur les filtres ont montré qu'on pouvait utiliser les argiles dispersives efficacement et en toute sécurité si le projet comporte des filtres bien conçus. Plusieurs barrages importants ont été construits récemment avec des zones imperméables en argiles dispersives [36, 39], des argiles traitées à la chaux ayant été employées dans certaines parties critiques de l'ouvrage.

Il est admis que tous les aspects du comportement des argiles dispersives ne sont pas connus actuellement. Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires, en particulier sur les points suivants : interaction complexe des phénomènes physico-chimiques, structure de l'argile compactée, état des contraintes effectives, série de cycles de mouillage et séchage, saturation partielle. Des recherches sont également nécessaires pour définir des moyens destinés à identifier et à évaluer les caractères dispersifs des sols.

En résumé, on peut construire des barrages sûrs avec des sols dispersifs, à condition de prendre certaines précautions. Les préoccupations résultant des problèmes examinés ci-dessus, l'attention à y porter et les précautions à prendre augmentent avec les dimensions du barrage. Ces précautions comprennent (mais ne se limitent pas à) : contrôle de la teneur en eau et de la densité, utilisation de filtres et de drains-filtres, mise en place soignée des matériaux, utilisation de couches de sable et gravier ou de sol traité à la chaux sur les parements, et traitement chimique des argiles dispersives.

they will be used. Recent research on filters has shown that dispersive clays can be safely and effectively used if well designed filters are incorporated into the design. Several major dams have been built in the last few years with impervious zones identified as dispersive clay [36, 39] and where lime-modified dispersive clays were used in certain critical areas in their construction.

It is believed that not all aspects of the behaviour of dispersive clays are known at present. Research is therefore needed, particularly on : complex interaction of physico-chemical phenomena, structure of compacted clay, effective stress state, sequence of wetting and drying cycles, partial saturation. Further research is needed in means to identify and evaluate dispersive character of soils.

In summary, safe dams can be built with dispersive clay soils if certain precautions are taken. The concern about problems and attention to precautions increase with dam size. Precautions include, but are not limited to, proper moisture and density control, use of filters and filter drains, select placement of materials, use of sand-gravel blankets or lime-modified soil on slopes, and chemical treatment of dispersive clays.

6. REFERENCES

1. SHERARD, J. L., and DECKER, R. S., eds., "Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects", STP 623, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, 1977.
2. SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P., and DECKER, R. S., "Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils", *Journal*, Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT 1, Jan., 1976, pp. 69-85.
3. RICHARDS, L. A., "Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils", US Dept. of Agriculture Handbook, No. 60, US Govt. Printing Office, Washington, DC, 1954.
4. VOLK, G. M., "Method of Determination of the Degree of Dispersion of the Clay Fraction of Soils", *Proceedings*, Soil Science Society of America, Vol. 2, 1937, p. 561.
5. AITCHISON, G. D., and WOOD, C. C., "Some Interactions of Compaction, Permeability, and Post-Construction Deflocculation Affecting the Probability of Piping Failures in Small Dams", *Proceedings*, 6th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. II, 1965, p. 442.
6. SHERARD, J. L., DECKER, R. S., and RYKER, N. L., "Piping in Earth Dams of Dispersive Clays", *Proceedings*, Speciality Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, part 1, 1972, pp. 584-626.
7. STEELE, E. F., "Characteristics and Identification of Dispersive Clay Soils", Annual Meeting of American Society of Agricultural Engineers, June, 1976.
8. PERRY, E. B., "Piping in Earth Dams Constructed of Dispersive Clay; Literature Review and Design of Laboratory Tests", Technical Report S-75-15, US Army Engineer Waterways Experiment Station, pp. 55-69, Nov. 1975.
9. SHERARD, J. L., DECKER, R. S., RYKER, N. L., "Hydraulic Fracturing in Low Dams of Dispersive Clay", *Proceedings*, Speciality Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, Part 1, 1972, pp. 653-689.
10. HALIBURTON, T. A., PETRY, T. M., and HAYDEN, M. L., "Identification and Treatment of Dispersive Clay Soils", Report to Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, pp. 12-13, July, 1975.
11. PERRY, E. B., "Susceptibility of Dispersive Clay at Grenada Dam, Mississippi, to Piping and Rainfall Erosion", Technical Report GL-79-14, US Army Engineer Waterways Experiment Station, pp. 49-52, September 1979.
12. EMERSON, W. W., "The Slaking of Soil Crumbs as Influenced by Clay Mineral Composition", *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 2, pp. 211-217, 1964.
13. HUDDLESTON, J., and LYNCH, D. D., "Dispersive Soils in Mississippi", US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Univ. of Miss., June 1975.
14. SHERARD, J. L., "Study of Piping Failures and Erosion Damage from Rain in Clay Dams in Oklahoma and Mississippi", US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC, March 1972.

15. BOURDEAUX, G. and IMAIZUMI, H., " Technological and Design Studies for Sobradinho Earth Dam Concerning the Dispersive Characteristics of the Clayey Soils ", *Proceedings, Fifth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. II, pp. 99-120, 1975.
16. CROUCH, R. J., " Field Tunnel Erosion - A Review ", *Journal of the Soil Conservation Service of New South Wales*, Vol. 32, No. 2, pp. 98-111, April 1976.
17. PERRY, J. P., " Lime Treatment of Dams Constructed with Dispersive Clay Soils ", *Transactions of the ASAE*, pp. 1093-1099, 1977.
18. INGLES, O. G., and WOOD, C. C., " The Contribution of Soil and Water Cations to Deflocculation Phenomena in Earth Dams ", *Proceedings, Thirty-Seventh Congress of Australian and New Zealand Assoc. for the Advancement of Sciences*, Canberra, Australia, Jan. 1964.
19. ELGES, H. F. W. K., " Problem Soils in South Africa - State of the Art ", *The Civil Engineer in South Africa*, Vol. 27, No. 7, pp. 347-349, 351-353, July 1985.
20. EAGLES, J. H., " Dispersive Soils : Testing of a Sydney Basin Clay ", *ANCOLD Bulletin*, No. 51, July 1978.
21. MURLEY, K. A., and REILLY, L. A., " Experience with Assessment of Dispersive Soils : Water Commission, Victoria ", *ANCOLD Bulletin*, No. 49, Oct. 1977.
22. RALLINGS, R. A., " An Investigation into the Causes of Failure of Farm Dams in the Brigalow Belt of Central Queensland ", *Water Research Foundation of Australia*, Bulletin No. 10, Dec. 1966.
23. STONE, P., " Design and Construction Procedures for Constructing Earth Dams with Dispersive Clays ", M. Sc. Thesis, Univ. of New South Wales, Sydney, Australia, 1977.
24. ACCIARDI, R. G., " Improvements to USBR Pinhole Test Equipment Design and Test Result Evaluation ", *Fourth Annual USCOLD Lecture, Dam Safety and Rehabilitation*, Denver, Colorado, Jan. 1984.
25. EMERSON, W. W., " A Classification of Soil Aggregates Based on Their Coherence in Water ", *Australian Journal of Soil Research* 5, pp. 47-57, 1967.
26. KINNEY, J. L., " Laboratory Procedures for Determining the Dispersibility of Clayey Soils ", Report No. REC-ERC-79-10, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, Sept. 1979.
27. CRAFT, D., " Chemical Test for Dispersive Soils-Problems and Recent Research ", *Fourth Annual USCOLD Lecture, Dam Safety and Rehabilitation*, Denver, Colorado, Jan. 1984.
28. CRAFT, D. and ACCIARDI, R. G., " Failure of Pore-Water Analyses for Dispersion ", *Journal, Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 110, No. 4, April 1984.
29. INGLES, O. G. and WOOD, C. C., " The Recognition of Failure in Earth Dams by Aerial Survey, " *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 26, No. 11, 1964.
30. SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P., DECKER, R. S., " Identification and Nature of Dispersive Soils ", *Journal, Geotechnical Division, ASCE*, Vol. 102, No. GT 4, April 1976.
31. HARMSE, H. J. von M., " Dispersiewe Grond en Hul Onstaan, Identifikasie en Stabilisasie ", *Ground Profile*, No. 22, April 1980.

32. SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P., TALBOT, J. R., " Basic Properties of Sand and Gravel Filters ", *Journal, Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 110, No. 6, June 1984.
33. SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P., TALBOT, J. R., " Filters for Silts and Clays ", *Journal, Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 110, No. 6, June 1984.
34. MCDANIEL, T. N., and DECKER, R. S., " Dispersive Soil Problem at Los Esteros Dam ", *Journal, Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 105, No. GT 9, Sept. 1979.
35. LOGANI, K. L., " Dispersive Soils Chosen for Ullum Core ", *World Water*, August 1979.
36. FORBES, P. J., SHEERMAN-CHASE, A. , BIRRELL, J., " Control of Dispersion in the Mnjoli Dam ", *International Water Power and Dam Construction*, Vol. 32, No. 12, Dec. 1980.
37. WAGENER, F. von M., HARMSE, H. J. von M., STONE, P., ELLIS, W., " Chemical Treatment of a Dispersive Clay Reservoir ", 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, Vol. 3, pp. 785-791, 1981.
38. SHERARD, J. L., " Trends and Debatable Aspects in Embankment Dam Engineering ", *International Water Power and Dam Construction*, England, Vol. 36, No. 12, Dec. 1984.
39. MELVILL, A. L., MACKELLAR, D. C. R., " The Identification and Use of Dispersive Soils at Elandsjagt Dam, South Africa ", Seventh Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Accra, Ghana, June 1980.
40. M. R. E. CLARK, " Mechanics, Identification, Testing, and Use of Dispersive Soil in Zimbabwe ", September 1986.
41. DECKER and DUNNIGAN, " Development and Use of the Soil Conservation Service Dispersion Test ", STP 623, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, 1977.
42. SHERARD, J. L., " Sink Holes in Dams of Coarse Broadly Graded Soils ", Trans. 13th International Congress Large Dams, Delhi, India, Vol. 2, pp. 25-36, 1979.
43. VAUGHAN, P. A. and SOARES H. H., " Design of Filters for Clay Core of Dams ", *Mic. Geotechnical Div. ASLE*, Vol. 108 ET, pp. 17-31, 1982.
44. International Commission on Large Dams, Bulletin 55, " Geotextiles as Filters and Transitions in Fill Dams ", 1986.
45. DASCAL O., POULIOT G., and HURTUBISE J., " Erodibility tests on a sensitive cemented marine clay (Champlian clay) ", *Dispersive Clays, Piping and Erosion in Geotechnical Projects*, ASTM STP 623, pp. 74-93, Philadelphia, 1977.
46. GERBER, F. A., HARMSE, H. J. von M., " N Evaluering Van Die Fisies-Chemiese Eienskappe Van Dispersiewe Grond En Die Metodes Vir Identifisering Van Dispersiewe Grond ". Technical Report TR 123, Hydrological Research Institute, Department of Water Affairs, Pretoria, January 1986. (The title in English is " An Evaluation of the Physico-Chemical Properties of Dispersive Soil and Methods for Identifying Dispersive Soil. ")
47. SHERARD, J. L., and DUNNIGAN, L. P., " Filters and Leakage Control in Embankment Dams ", *Proc. ASCE Symposium on Seepage and Leakage From Dams and Impoundments*, ASCE Spring Convention, Denver, May 1985.

48. MELVILL, A. L., " Filter for Dispersive Soils ", Proc. Saice Symposium on Filters, Johannesburg, October 1986.
49. DUNNIGAN, L. P., SHERARD, J. L., and TALBOT, J. R., Separate discussions on reference No. 28, All published in *ASCE Geotechnical Journal*, Vol. 111, No. 8, August 1985.
50. GERBER, F. A. and HARMSE, H. J. Von M., " Proposed Procedure for Identification of Dispersive Soils by Chemical Testing ", The Civil Engineer in South Africa, *Journal of the Saice*, Vol. 29, No. 10, Johannesburg, October 1987.
51. P. C. KNODEL, Dispersive Soils Section, Materials Chapter : Advanced Dam Engineering for Design Construction and Rehabilitation, R. B. Jansen, Van Nostrand-Reinhold, 1988, pp. 176-182.

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : juillet 1990
N° 15137
ISSN 0534-8293
Couverture : Olivier Magna

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

*The General Secretary / Le Secrétaire Général :
André Bergeret - 2004*



**International Commission on Large Dams
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**
<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

*The General Secretary / Le Secrétaire Général :
André Bergeret - 2004*



**International Commission on Large Dams
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**
<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>