



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JOSÉ REGINALDO RODRIGUES DO NASCIMENTO FILHO**  
**ADRIÀ PUÑET SORIANO**

**EROSÃO DE UM SOLO TRATADO COM CAL**

**RECIFE**  
**2017**

JOSÉ REGINALDO RODRIGUES DO NASCIMENTO FILHO  
ADRIÀ PUÑET SORIANO

**EROSÃO DE UM SOLO TRATADO COM CAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao  
Curso de Engenharia Civil, da Ecole Spéciale des  
Travaux Publics du Bâtiment et de l'Industrie de Paris  
- ESTP, como requisito para obtenção do título de  
Engenheiro Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Abdelkrim Bennabi

RECIFE

2017

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- N244e Nascimento Filho, José Reginaldo Rodrigues do.  
Erosão de um solo tratado com cal / José Reginaldo Rodrigues do Nascimento Filho, Adrià Puñet Soriano. – 2017.  
53 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Abdelkrim Bennabi.  
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Departamento de Engenharia Civil, 2017.  
Inclui Referências e Anexo.  
Nota: TCC apresentado a Ecole Spéciale des Travaux Publics du Bâtiment et de l'Industrie de Paris – ESTP, no idioma francês.
1. Engenharia Civil. 2. EFA. 3. triaxial. 4. Erosão. 5. Proctor. 6. Solo. 7. Coesão. 8. Tratamento de cal. 9. Ângulo de atrito. 10. Fluxo. I. Soriano, Adrià Puñet. II. Bennabi, Abdelkrim. (Orientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-75

Attestation de réalisation de projet

Je soussigné, Abdelkrim BENNABI, Adjoint au Directeur de la Recherche de l'ESTP, atteste que

**M. José Reginaldo RODRIGUES DO NASCIMENTO FILHO**

a réalisé un PIER (Projet Industriel, d'Entrepreneuriat et de Recherche) à l'Institut de Recherche en Constructibilité (IRC) de l'ESTP en 2014-2015.

Le projet, réalisé sur plusieurs mois, portait sur l'étude de l'érosion d'un sol traité à la chaux. Reginaldo a eu un comportement exemplaire pendant le projet car, en effet, il n'a pas ménagé ses efforts pour réaliser des essais d'érosion à l'érodimètre EFA (Erosion Function Apparatus), des essais triaxiaux et d'autres essais de caractérisation géotechnique des sols utilisés dans le projet.

Le projet, réalisé en binôme avec un autre étudiant, a été présenté à la 22<sup>ème</sup> journée de l'Innovation de l'ESTP, en présence de nombreux industriels.

Ci-dessous, le tableau de notation individuelle de ce projet.

| NOTATION DU PROFESSEUR EN CONCERTATION AVEC LES PARTENAIRES               | NOTE /20        | COEFFICIENT | CALCUL<br>NOTE x<br>COEFF. |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------|----------------------------|
| Esprit d'initiative, implication de l'élève, curiosité, travail en équipe | 18              | 7           | 126                        |
| Rapport final                                                             | 16              | 5           | 80                         |
| Fiche de synthèse                                                         | 12              | 1           | 12                         |
| Poster : Forme                                                            | 12              | 0,66666667  | 8                          |
| Poster : Fond                                                             | 15              | 1,33333333  | 20                         |
| Présentation orale - NOTATION DU JURY                                     | 16              | 5           | 80                         |
|                                                                           | <b>TOTAL</b>    | <b>20</b>   | <b>326</b>                 |
|                                                                           | <b>NOTE /20</b> |             | <b>16,3</b>                |

Cachan, le 2 mai 2016  
Abdelkrim BENNABI



## **Apresentação**

A erosão é um fenômeno muito importante no domínio da engenharia civil. A erosão interna, objeto de estudo desta pesquisa, é um problema encontrado nas obras hidráulicas em terra que pode provocar uma diminuição das performances, mas também provocar a ruptura da barragem.

Este trabalho é dividido em duas partes. A primeira é composta pela síntese bibliográfica que é dividida em seis subpartes. A segunda parte é composta por ensaios de laboratório.

Os ensaios aqui abordados são de dois tipos: eridrômetro EFA utilizado para determinação das características de erosão e ensaios triaxiais para as características mecânicas. Os corpos de prova utilizados apresentavam tratamentos com cal após uma cura de 1, 7, 28 e 90 dias, incluindo corpo de prova com solo não tratado.

# Érosion d'un sol traité à la chaux

Adrià PUÑET - SORIANO  
José Reginaldo RODRIGUES DO NASCIMENTO FILHO

Encadrés par : Abdelkrim BENNABI (Adjoint au Directeur de la Recherche)

Partenaire : ESTP-IRC

PIER n°182

## **Résumé**

L'érosion est un phénomène très important dans le domaine de l'ingénierie civile. L'érosion interne, l'objet d'étude de cette recherche, est un problème rencontré dans les ouvrages hydrauliques en terre qui peut provoquer une diminution des performances, mais aussi provoquer la rupture de l'ouvrage.

Plusieurs travaux de recherche ont concerné l'augmentation des propriétés mécaniques des sols par traitement à la chaux, comme par exemple, le travail de Haghighi qui a constaté l'amélioration du comportement des ouvrages avec le traitement à long terme. L'ESTP possède un dispositif unique en Europe, qui a été développée par le professeur Briaud (Université Texas A&M), pour mesurer l'érosion du sol: l'Erosion Function Apparatus (EFA). En partenariat avec Lhoist, l'ESTP mène des études pour vérifier l'efficacité du traitement à la chaux dans le domaine des ouvrages hydrauliques en terre. Le but de cette étude est la détermination, d'une part, des caractéristiques mécaniques comme la cohésion et l'angle de frottement interne du sol, mais aussi les caractéristiques de résistance à l'érosion. Une corrélation des deux types de résultat est enfin réalisée.

L'étude a été réalisée à partir de deux types d'essais : des essais triaxiaux pour les caractéristiques mécaniques et l'érodimètre EFA pour les caractéristiques d'érosion. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de sol compacté à 95% de l'optimum Proctor, sans traitement ou avec traitement à la chaux après une cure de 1, 7, 28 et 90 jours. Le sol ayant fait l'objet de cette étude est un sol limoneux fourni par la société Lhoist (sol de Marche-les-Dames).

Avec le temps de cure, nous avons observé une amélioration de la résistance à l'érosion du sol traité. Le sol non traité est d'une grande érodabilité, par contre, le sol traité est de moyenne érodabilité jusqu'à 28 jours, puis on constate qu'avec une cure de 90 jours le sol augmente sa résistance et devient faiblement érodable.

Les essais triaxiaux démontrent qu'avec le traitement à la chaux le sol augmente sa cohésion.

Ce rapport est divisé en deux parties. La première est composée de la synthèse bibliographique qui est divisée en six sous-parties. La deuxième partie est composée des essais de laboratoire.

**Mots clés :** EFA, triaxial, érosion, Proctor, limon, sol, cohésion, traitement à la chaux, cisaillement, angle de frottement, écoulement.

## ***Abstract***

Erosion phenomenon is very important in the field of civil engineering. Internal erosion is a problem in the hydraulic works that can cause the collapse of a dam.

There are several international works about increasing the mechanical properties of soils with lime treatment; for example, the Haghighi work where he found the improvements with long-term treatment. ESTP utilize a specific device, which was developed by Professor Briaud (Texas A&M), to measure soil erosion: Erosion Function Apparatus (EFA). In partnership with Lhoist, ESTP conducts studies to verify the effectiveness of lime treatment against internal erosion soils of hydraulic structures.

The purpose of this study is the determination of value of cohesion, the angle of friction, and the erosion rate.

This study deals with two parts and types of tests. The samples subjected to the tests were previously compacted at 95% of Optimum Proctor.

EFA tests were realized for a soil that was not treated and for a soil treated with 2.5 % lime at different curing time: 1 day, 7 days, 28 days and 90 days. The second test done was the Consolidated Undrained triaxial test. For both types of tests, we used similar samples. Triaxial and erodibility tests can show us the evolution of mechanical and hydraulic properties of the treated soil and compare the efficacy of the treatment. With curing time, we can see an increase in soil hydraulic properties from the EFA test. As a result, the untreated soil is highly erodible. On the contrary, the treated soil has a medium erodability and at 90 days curing, it can be classified as a soil having a low erodibility.

Triaxial tests demonstrate that with the treatment with lime the soil increases its cohesion.

This report is divided in two parts. The first consists of the bibliography review that is divided into six sub-sections. The second part consists of a presentation of laboratory tests.

**Keywords:** EFA, triaxial, erosion, Proctor, soil, cohesion, lime treatment, cohesion, angle of friction, flow.

# SOMMAIRE

## Synthèse bibliographie

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Principaux problèmes des ouvrages hydrauliques.....</b>             | <b>2</b>  |
| <b>2. Érosion .....</b>                                                   | <b>2</b>  |
| - 2.1. Érosion externe .....                                              | 2         |
| - 2.2. Érosion interne.....                                               | 2         |
| Figure 1: Les différentes formes d'érosion interne.....                   | 2         |
| 2.2.1. Typologie de l'érosion interne.....                                | 2         |
| 2.2.2. Facteurs d'étude de l'érosion interne.....                         | 5         |
| <b>3. Caractérisation de l'érosion .....</b>                              | <b>6</b>  |
| 3.1. Essais d'érosion .....                                               | 6         |
| 3.1.1. Essais érosion externe .....                                       | 6         |
| 3.1.3 Essais d'érosion interne .....                                      | 7         |
| <b>4. Traitement à la chaux .....</b>                                     | <b>10</b> |
| <b>5. Classifications du sol .....</b>                                    | <b>10</b> |
| 5.2. Paramètres.....                                                      | 11        |
| 5.3. Objectifs de la classification du sol.....                           | 12        |
| 5.4. Typologies de Classification .....                                   | 12        |
| <b>6. Étude française sur l'érosion des sols traités à la chaux .....</b> | <b>12</b> |
| 1. Essai Proctor .....                                                    | 16        |
| 2. Préparation des échantillons .....                                     | 18        |
| 3. Essai triaxial.....                                                    | 21        |
| 4. Essai EFA.....                                                         | 28        |
| 5. Conclusions et perspectives.....                                       | 40        |
| 6. Bibliographie .....                                                    | 41        |
| Annexe : Type de classification du sol.....                               | 42        |
| Table des illustrations.....                                              | 46        |
| Figure 1: Les différentes formes d'érosion interne.....                   | 0246      |

## 1. Principaux problèmes des ouvrages hydrauliques.

Parmi les plus importants ouvrages dans le domaine du génie civil il y a les ouvrages hydrauliques comme les barrages, les digues ou les levées. Ces ouvrages sont souvent des ouvrages en terre pour lesquels l'érosion interne peut constituer un grand danger, susceptible de générer des dommages très importants, voire la rupture de ces ouvrages. Pour cette raison, il est essentiel d'étudier d'une manière approfondie les interactions de l'eau avec les ouvrages en terre.

## 2. Érosion

### - 2.1. Érosion externe

L'érosion externe est la déstructuration de surface par arrachement et déplacement des particules d'un sol ou s'une roche sous l'action d'un agent extérieur naturel (eau, air, froid, chaleur, gel, dessiccation, etc.). On peut identifier trois types d'érosion externe : érosion pluviale, érosion fluviale et enfin érosion maritime

### - 2.2. Érosion interne

Il s'agit de l'entraînement de matériaux (particules de sol) au sein du corps de l'ouvrage ou de sa fondation. Ce type d'érosion est provoqué par des *percolations* excessives à travers l'ouvrage. Le conduit de fuite s'agrandit par érosion jusqu'à provoquer l'effondrement de la structure. Le schéma ci-dessous montre les principaux types d'érosion interne.

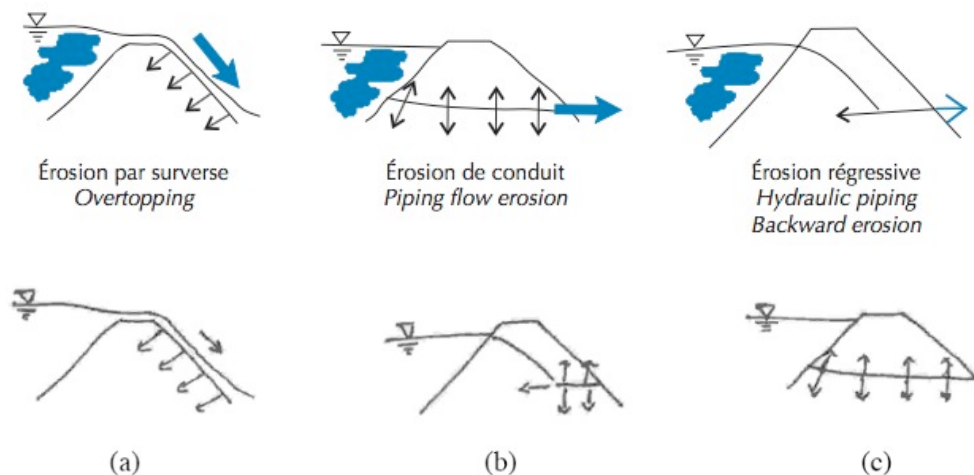


Figure 1: Les différentes formes d'érosion interne

#### 2.2.1. Typologie de l'érosion interne

Deux processus sont à la base des phénomènes d'érosion interne :

- L'arrachement (ou le détachement des particules) → déstabilisation d'une particule sous l'action d'une force mécanique
- le transport → mouvement des particules

Il existe différents mécanismes pour chaque processus.

#### **Arrachement :**

- **L'entraînement** : détachement des particules des parois d'une conduite, sous l'effet de l'écoulement d'un fluide. Le fluide exerce des contraintes de cisaillement dues au frottement fluide-grain. Celles-ci dépendent de la vitesse du fluide et de la résistance du sol.

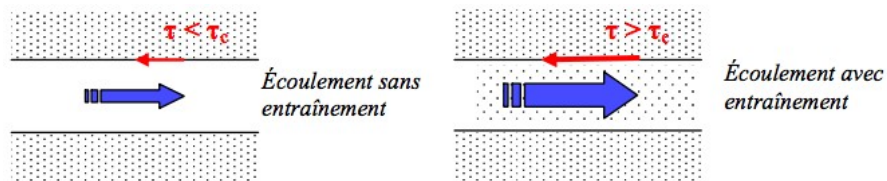


Figure 2 : Phénomène d'entraînement

- **Érosion régressive** : arrachement de particules de sol une à une, sous l'effet de la poussée de l'écoulement du fluide, et progression de l'aval vers l'amont de l'ouvrage.

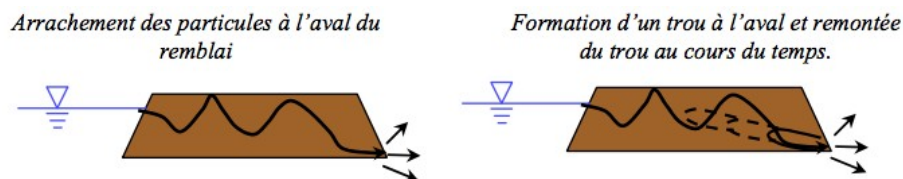


Figure 3 : Phénomène d'érosion régressive

- **Déboufrage** : arrachement/déplacement brutal d'un volume de sol déséquilibré par l'action de la poussée de l'eau à l'intérieur d'un massif rocheux.

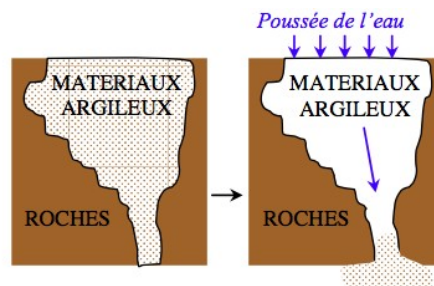


Figure 4 : Phénomène de déboufrage

- **Boulance** : conséquence d'un gradient hydraulique vertical et ascendant. Sous l'influence de l'écoulement, le sol se comporte comme un liquide. Les forces d'écoulement s'opposent directement au poids des particules et la résultante des

forces est dirigée vers le haut, ce qui provoque un entrainement des particules par écoulement.

- **Dissolution** : ce n'est pas un phénomène d'arrachement mécanique mais chimique qui correspond à la transformation chimique ou thermique d'un élément constitutif de sol d'un état solide en un état liquide. La modification de la composition des grains provoque une altération des caractéristiques mécaniques du sol : augmentation de porosité et perméabilité.
- **Défloculation** : désagrégation des agglomérats de particules ou de feuillets d'argile.

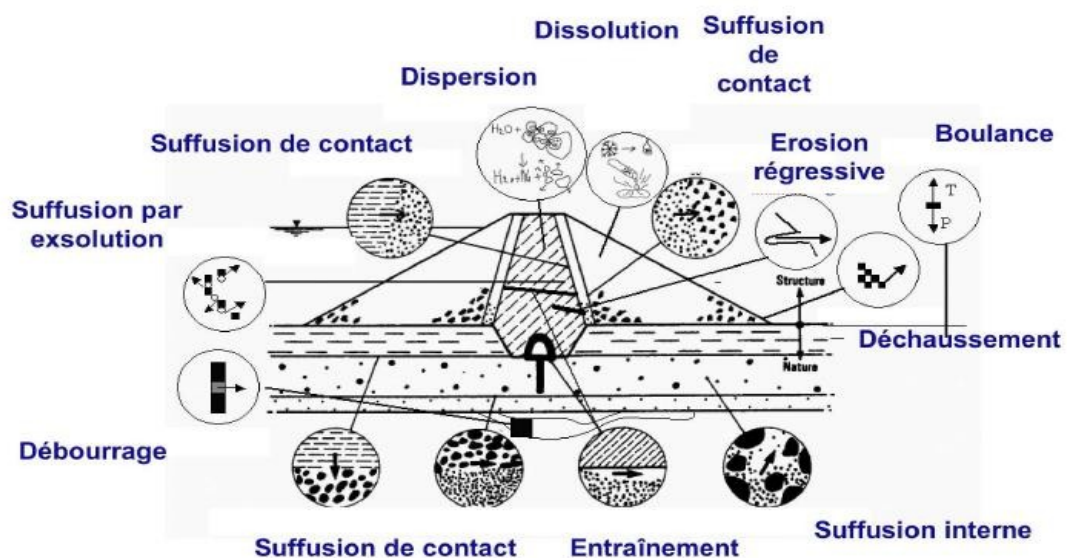


Figure 5 : Schéma représentatif des divers phénomènes initiateurs de l'érosion dans un barrage (cité par Blais, 2004)

### Transport :

- **Renard hydraulique** : c'est un arrachement régressif des particules de l'aval du sol vers un milieu extérieur et en progressant vers l'amont, jusqu'à la formation d'un conduit continu.
- **Suffusion** : c'est une restructuration des petites particules du sol sans modification du volume solide total du sol. La perméabilité change mais la granulométrie globale du sol ne modifie pas.

### Autres phénomènes

- **Exsolution** : est l'expulsion de l'air piégé dans les ouvrages lors de leur mise en eau.

- **Auto filtration** : est un phénomène qui peut se produire en même temps que la suffusion.

On trouve une simplification des types d'érosion interne. Fell & Fry en 2005 ont identifié 4 phénomènes élémentaires d'érosion interne :

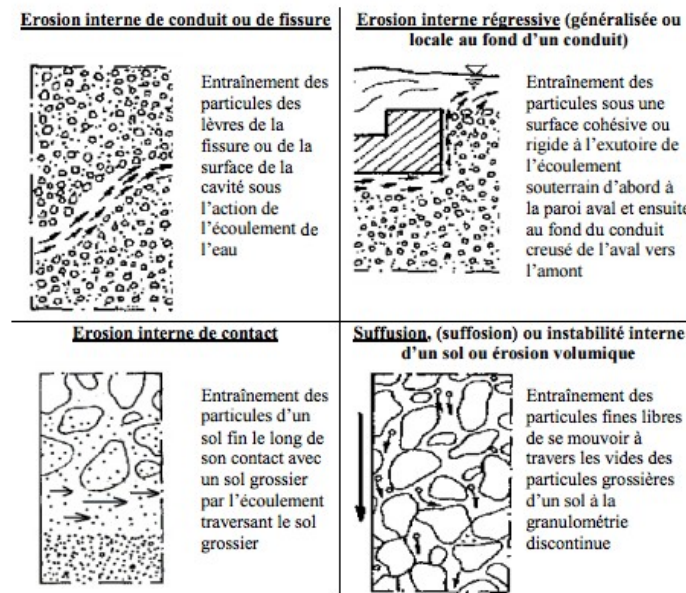


Figure 6 : Les différents mécanismes d'initiation de l'érosion interne

### 2.2.2. Facteurs d'étude de l'érosion interne

Actuellement, les critères et les modélisations sont insuffisants pour décrire le phénomène d'érosion interne parce que l'effet hydraulique-géotechnique est peu traité. L'érosion interne est une combinaison de divers paramètres qui ont une relation avec l'eau, principalement. Ces paramètres sont les suivants :

- Nature du matériau (sensibilité à l'érosion)
- Granulométrie
- Confinement
- Densité du sol
- Angularité des grains
- Quantité de fines dans le matériau
- Interactions fluide-matériaux
- Degré de saturation
- Gradient hydraulique et son incrément
- L'eau (vitesse et incidence)
- La géométrie de l'ouvrage en terre (dimensions)

### 3. Caractérisation de l'érosion

Afin d'évaluer l'effet de l'érosion, il existe une relation établie entre le taux d'érosion  $\varepsilon$  (la masse de sol érodée par unité de temps et par unité de surface) et la contrainte de cisaillement  $\tau$  (contrainte hydraulique appliquée par l'écoulement sur le sol). Cette relation est représentée avec l'équation :

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

où :

- ~~la~~ ~~contrainte~~
- ~~la~~ ~~contrainte~~ critique
- ~~la~~ ~~contrainte~~ hydraulique

À partir des observations obtenues sur un sol soumis à un écoulement, l'érosion peut se produire si la contrainte ( $\tau$ ) exercée par le fluide sur le sol dépasse une valeur caractéristique du sol ( $\tau_c$ ) à un certain état de consolidation et de saturation. La contrainte de cisaillement critique représente la sensibilité du sol à l'érosion.

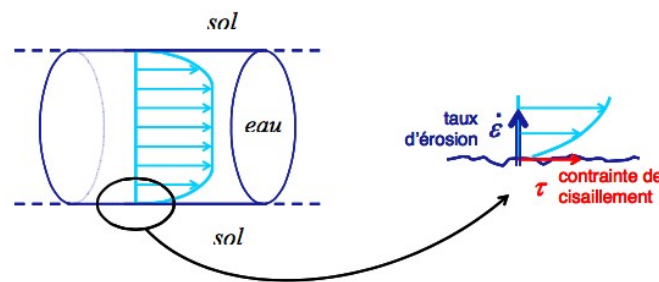


Figure 7 : illustration de la contrainte de cisaillement

Certains auteurs pensent que l'érosion ne dépend pas seulement de la contrainte, c'est pour cela qu'il y a des équations plus complètes qui essaient de combler ces lacunes mais pour l'instant, il s'agit de modèles empiriques et il y a paramètres qu'il n'est pas possible de déterminer pratiquement. C'est la raison pour laquelle les travaux de Shields (1936) portant sur le transport des sédiments par l'action de l'eau et en particulier sur le calcul de la contrainte critique de mise en mouvement des particules de sol par érosion, restent d'actualité.

#### 3.1. Essais d'érosion

##### 3.1.1. Essais érosion externe

- **Hydraulic Flume test** : L'essai consiste à faire s'écouler le fluide sur la surface de l'échantillon. La force de traction est calculée par la mesure de la vitesse d'écoulement. Le taux d'érosion est défini comme la pente de la courbe de masse érodée avec le temps. La masse érodée est la différence entre la masse sèche avant et après l'essai.

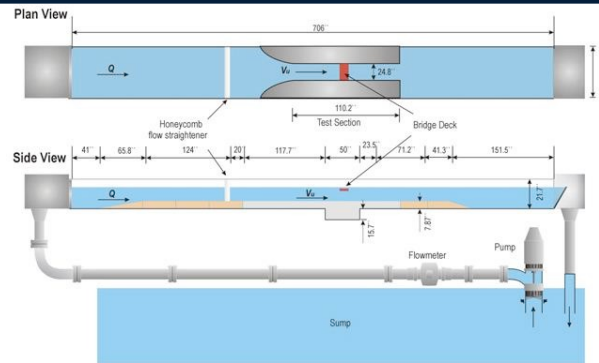


Figure 8: Schéma Hydraulic Flume test

- **Rotating cylinder test** : L'essai consiste à mettre en rotation le cylindre extérieur en maintenant fixe le cylindre intérieur qui contient l'échantillon de sol. Le fluide est alors entraîné et exerce un moment de torsion sur l'échantillon de sol. La contrainte de cisaillement exercée par le fluide est obtenue en écrivant l'égalité des moments de torsion :

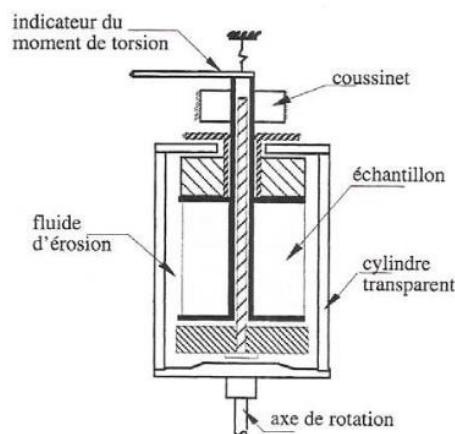


Figure 9 : Schéma rotating cylinder test

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

où

:

$R_1, R_2$  sont les rayons du cylindre, intérieur et extérieur

$\omega$  : vitesse angulaire imposée au cylindre extérieur

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide

### 3.1.3 Essais d'érosion interne

- **Hole Erosion Test (HET)** : L'essai consiste à établir un écoulement dans un trou préformé de l'échantillon à l'instar du pinhole test, avec cependant un suivi instrumenté de l'essai. Grâce aux paramètres mesurés et estimés tels que le débit,

le gradient hydraulique et l'évolution du diamètre du trou, on peut déterminer la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion.

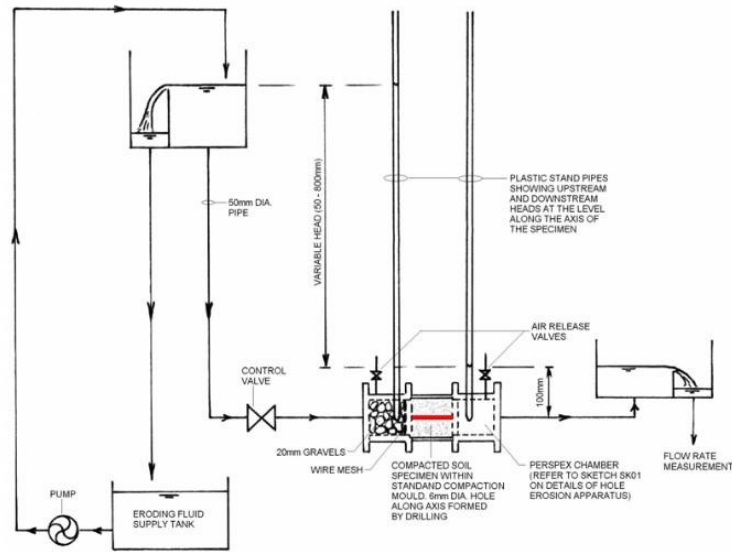


Figure 10: Schéma Hole Érosion test

- **EFA (Erosion Function Apparatus)** : c'est un appareil qui mesure la fonction d'érosion exercée par l'eau à la surface d'un sol. L'essai consiste à établir un écoulement d'eau à la surface d'une éprouvette de sol installée à la base d'un conduit horizontal dont elle déborde de 1 mm (figure 11). Différentes vitesses d'écoulement sont appliquées selon un protocole précis et le temps mis pour éroder 1 mm de cette couche est comptabilisé. Cela permet de tracer une courbe (courbe de la fonction d'érosion) donnant la variation du taux d'érosion (1 mm divisé par le temps d'érosion) en fonction de la vitesse d'écoulement. Il est également possible de tracer la courbe du taux d'érosion en fonction de la contrainte de cisaillement obtenue à partir de la vitesse d'écoulement en utilisant la théorie des écoulements en conduite forcée. La contrainte critique de cisaillement est la valeur seuil à partir de laquelle l'érosion commence.

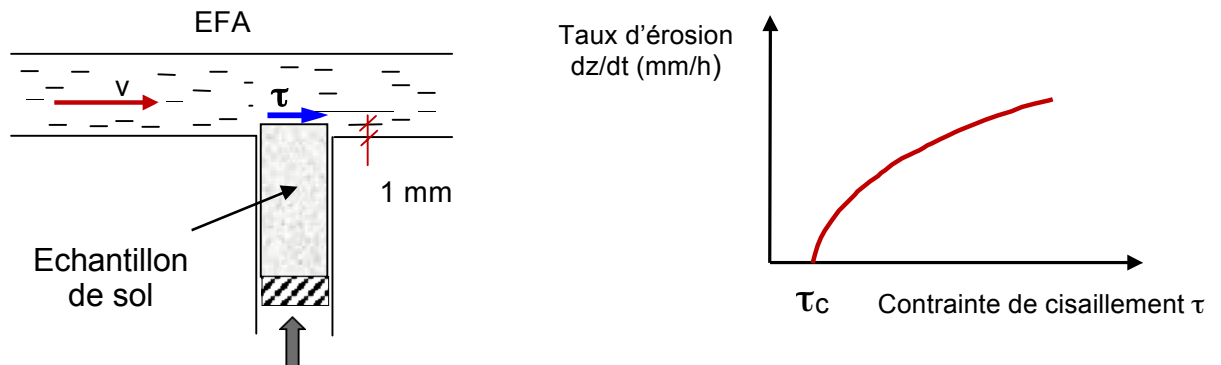


Fig.11 : Fonction d'érosion  $dz/dt = F(\tau)$



Fig.12 : Erodimètre EFA

L'EFA est composé de:

- un réservoir d'eau (700 litres);
- une conduite horizontale de section rectangulaire en acier munie de fenêtres en Plexiglas qui permettent le contrôle du déroulement de l'essai.
- une pompe à eau et une manivelle (pour choisir le débit d'eau).
- un débitmètre et un capteur de température pour mesurer la vitesse de l'eau dans la conduite et calculer la viscosité cinématique de l'eau.
- un ordinateur pour commander la montée de 1 mm de sol dans la conduite au début de l'essai, pour chaque vitesse d'écoulement, et enregistrer les données des capteurs.

La Classification d'érodabilité des sols en fonction de la contrainte de cisaillement, proposée par Briaud (...), est utilisée :

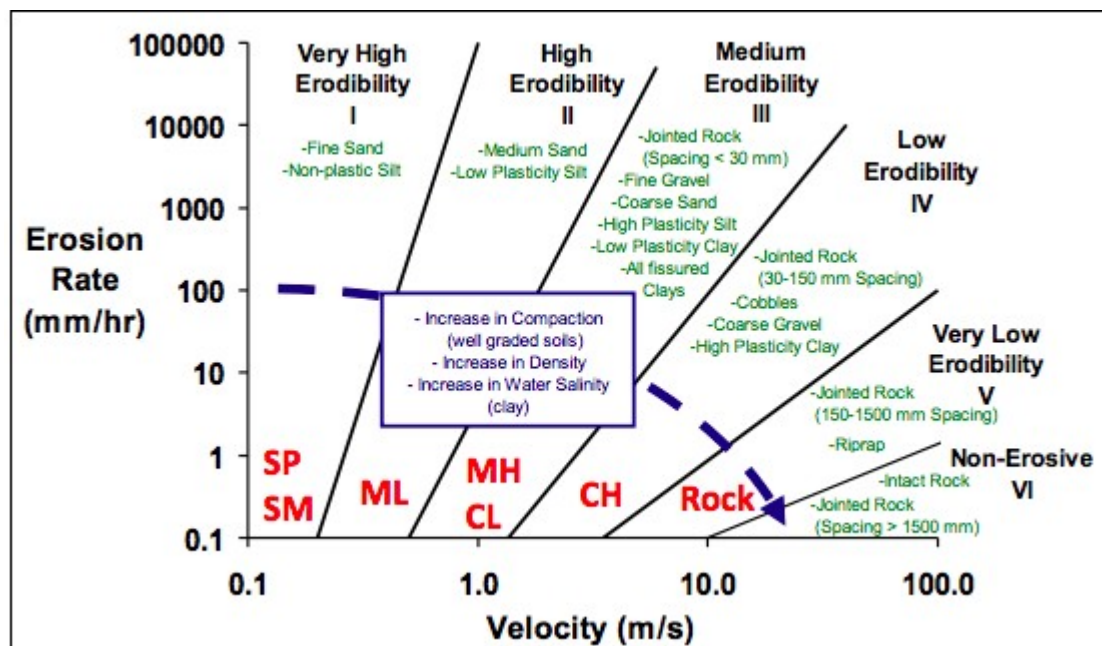


Figure 13 : Classification de l'érodabilité de Briaud

## 4. Traitement à la chaux

Le traitement des sols à la chaux est une technique qui consiste à incorporer cet élément jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène avec des propriétés nouvelles. Le traitement à la chaux (vive) permet de diminuer la teneur en eau des sols à court terme et d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques à plus ou moins long terme. Dans ce projet, le traitement du sol est envisagé pour améliorer sa tenue vis-à-vis du risque d'érosion interne.

## 5. Classifications du sol

### 5.1. Propriétés du sol

- La granulométrie est l'étude permettant de mesurer les dimensions des grains d'un mélange, d'évaluer et de déterminer les différentes répartitions des particules élémentaires du sol.

Classification du sol selon la taille de ses particules: limon, sables, argiles, etc.

Tamis choisis :

40 – 20 – 12,5 – 8 – 4 – 2 – 0,500 – 0,250 – 0,125 – 0,080 – 0,063 mm

| N tamis (ASTM) | Ouverture (mm) |
|----------------|----------------|
| 4              | 4,76           |
| 10             | 2              |
| 20             | 0,85           |
| 40             | 0,425          |
| 60             | 0,25           |
| 100            | 0,15           |
| 200            | 0,075          |

L'analyse granulométrique par sédimentométrie est utilisée pour les sols fins (particules de taille inférieure à 80 micromètres). Elle est basée sur l'utilisation de la loi de Stokes selon laquelle les particules de sol se déplacent à une vitesse constante (vitesse de sédimentation). La loi de Stokes s'exprime par la relation suivante :

$$v = (d^2 \cdot (\rho_s - \rho_L) \cdot g) / (18 \cdot \mu)$$

dans laquelle  $\rho_s$  est la masse volumique du sol,  $\rho_L$  est la masse volumique du fluide et  $\mu$  est la viscosité du fluide.

- Coefficient d'uniformité : il caractérise la répartition en taille des éléments qui composent un sol.

$$G_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$C_u < 5 \rightarrow$  sol uniforme;  
 $C_u < 2,5 \rightarrow$  sol très uniforme

- Coefficient de courbure :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}}$$

$1 < C_c < 3$ : sol bien gradué

- Plasticité : capacité d'un sol de changer de forme sans se fracturer.  
 Limites d'Atterberg : Limite de liquidité (LL), Limite de plasticité (LP) et Limite de retrait

- Indice de plasticité :  $IP = LL - LP$

- Teneur en eau est la quantité de l'eau qu'il y a dans un échantillon

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s}$$

où  $m_h$  est la masse totale du sol et  $m_s$  est la masse de sol sec.

- Masse volumique apparente : masse volumique du sol humide :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

- Teneur de substance organique : quantité de matière organique d'origine animale ou végétale qu'il y a dans le sol.

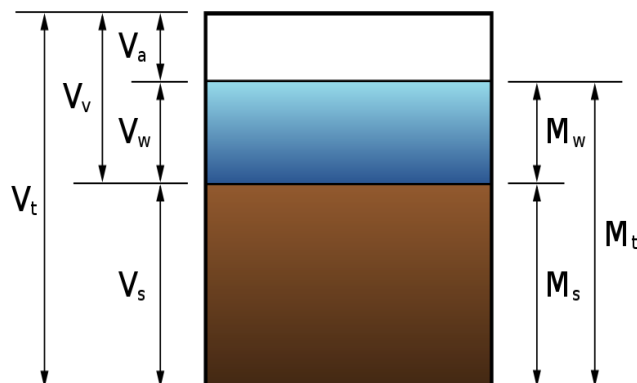
## 5.2. Paramètres

Porosité (n)

Indice des vides (e)

Teneur en eau ( $\omega$ )

Degré de saturation ( $S_r$ )



$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

$$S_r = \frac{W}{V_v}$$

$$\gamma_n = \frac{W_t}{V_t}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1 + \omega}$$

$$\gamma_{st} = \frac{W_s + W_w + V_a \gamma_w}{V_T}$$

### 5.3. Objectifs de la classification du sol

- Evaluer les sols affectés ou à utiliser sur un chantier.
- Connaître leurs propriétés de manière approximative, rapide et économique.
- Grouper les sols selon leurs propriétés fondamentales.

### 5.4. Typologies de Classification

Il y a différentes classifications d'un sol. Plusieurs pays utilisent une classification spécifique. En annexe on peut voir comme exemple: deux classifications américaines, une classification espagnole et une autre française.

## 6. Étude française sur l'érosion des sols traités à la chaux

(REF : Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques, Iman HAGHIGHI, septembre 2012)

Cette étude porte sur la caractérisation des différents aspects du comportement des sols traités à la chaux. Trois types d'essais ont été utilisés (HET, MoJET, ECT) et l'analyse a été réalisée pour le sol non traité et pour le sol traité à la chaux avec un temps de cure de 7 et 90 jours.

#### Matériaux utilisés

Les essais ont été réalisés pour deux types de matériaux : limons et argiles originaires d'Héricourt (Haute-Saône, France). Le premier sol de nature limoneuse est appelé le

«Limon d'Héricourt » et le deuxième l'« argile d'Héricourt ».

|               |                                           | Limon<br>d'Héricourt | Argile<br>d'Héricourt |
|---------------|-------------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Non<br>traité | Teneur en eau (%)                         | 18                   | 23,5                  |
|               | Masse volumique sèche ( $\text{kg/m}^3$ ) | 1650                 | 1620                  |
| Traité        | Teneur en eau (%)                         | 26,5                 | 39                    |
|               | Masse volumique sèche ( $\text{kg/m}^3$ ) | 1550                 | 1210                  |

Pour la réalisation des éprouvettes, la démarche suivante a été appliquée :

Les éprouvettes de l'essai d'érosion de trou (HET) sont compactées en 8 couches de 70 mm de diamètre intérieur et de 150 mm de longueur.

Les éprouvettes de MoJET et ECT ont été compactées en une seule couche de 48 mm d'épaisseur et 152 mm de diamètre.

Le traitement a été effectué avec 2% de chaux pour le sol limoneux et 5% de chaux pour le sol argileux.

#### Essais d'érodimètre à jets mobiles (MoJET)

L'érodimètre à jets mobiles est un appareil dont l'objectif est de reproduire à la fois l'impact des gouttes de pluie et le transport par ruissellement. L'essai consiste à réaliser six jets d'eau rotatifs qui attaquent perpendiculairement la surface du sol.

Le dispositif a:

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

Il permet la rotation de la partie mécanique active qui, à partir de gicleurs, commande six jets d'eau identiques. Tout l'appareil est complété par une source de pression et une batterie, l'ensemble pouvant se loger dans une boîte de transport pour les déplacements sur site.

La sensibilité à l'érosion est mesurée à partir de la masse érodée de sol par l'action des jets d'eau injectés à la pression constante de 1 bar (100 kPa) pendant une minute.

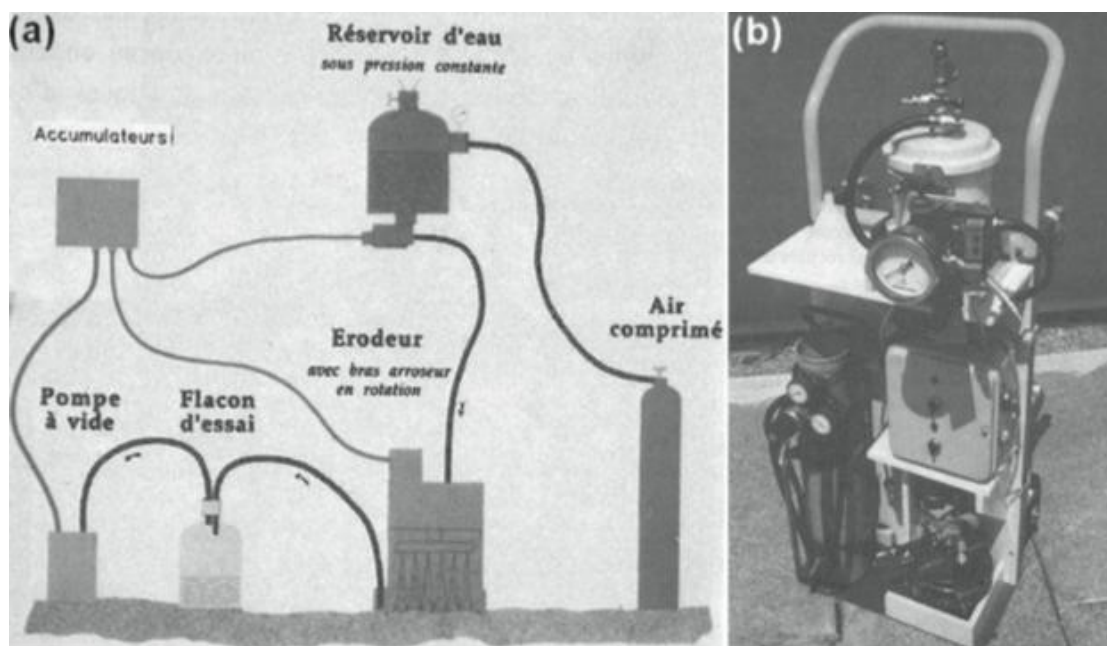


Figure 13: Schéma MoJET

#### Essais d'émiettage amélioré (ECT)

Les éprouvettes de l'essai d'émiettage amélioré ont été prélevées in situ à l'aide d'une trousse coupante dans des éprouvettes supplémentaires exécutées selon le protocole MoJET. Les éprouvettes cylindriques de 15 mm de diamètre et 20 mm de hauteur ont été prélevées en enfoncement statique et non rotatif à l'aide d'une trousse coupante (Figure 14) puis arasées sous confinement. Étant donnée la rigidité du sol traité à la chaux, ce protocole s'est avéré le moins perturbateur.



Figure 14: Trousse coupante

Le but de cet essai est d'étudier et de déterminer la géométrie d'un échantillon de sol en fonction du temps.

L'essai consiste à placer un échantillon de sol dans un récipient d'eau et à faire des observations et enregistrements de cet échantillon au cours du temps à l'aide de caméras numériques.

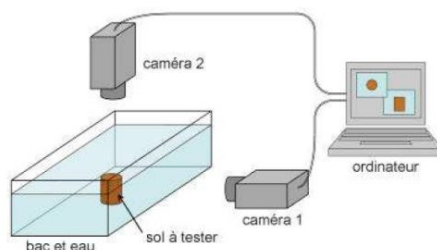


Figure 15: Schématisation d'essai d'émiettement amélioré

### Conclusions

Cette étude a montré que les sols traités à la chaux ont développé une résistance considérable à l'érosion. Sur la base de ces trois différents essais pour déterminer la diminution de la sensibilité à l'érosion des sols, Haghighi a conclu:

Les sols traités se sont avérés largement plus résistants que les sols non traités. Concernant les essais HET, la contrainte critique à l'érosion interne n'a pas pu être mesurée concrètement sur les sols traités. L'érosion est susceptible d'être déclenchée à une contrainte au moins quatre fois supérieure à celle de l'état non traité. La masse érodée à la surface par le dispositif MoJET est au minimum 300 fois plus élevée pour les sols traités. Enfin, les sols traités sont trouvés insensibles à l'eau par l'ECT. Cela représente un gain considérable dans la résistance hydraulique des matériaux traités. Cependant, il faut noter que les éprouvettes sont confectionnées au laboratoire avec des conditions bien contrôlées notamment au niveau homogénéité et compactage. Dans la pratique à l'échelle d'ouvrages, les conditions peuvent varier. En conséquence, une étude a été entreprise sur ouvrages en vraie grandeur qui est présentée dans la partie suivante.<sup>1</sup>

Haghighi a réalisé des essais directement sur les ouvrages expérimentaux afin de comparer le comportement d'un ouvrage en terre classique et d'un ouvrage en sol traité à la chaux. Comme conclusion il a trouvé:

Dans l'ensemble des essais, le matériau issu de l'ouvrage traité à la chaux présente donc une sensibilité à l'érosion nettement plus faible que le matériau naturel. Les propriétés de sol traité semblent se préserver sans dégradation pendant une longue durée de sollicitation hydraulique ce qui n'est pas le cas du sol non traité. Les résultats obtenus sont en concordance avec les essais effectués sur les sols préparés au laboratoire. Bien que cette augmentation de la résistance et la diminution de la sensibilité face à l'érosion ne soient

---

<sup>1</sup> Iman Haghighi, Iman Haghighi. Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques - <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00778066/document>

naturellement pas aussi importantes sur les ouvrages qu'au laboratoire, elles restent très significatives par rapport à l'état naturel/non traité.<sup>1</sup>

## Laboratoire

Pour cette étude, nous avons utilisé un **sol limoneux** de Marche les Dames, de classe **A1**, fourni par Lhoist.

Nous allons détailler la procédure expérimentale de tous les essais et des échantillons.

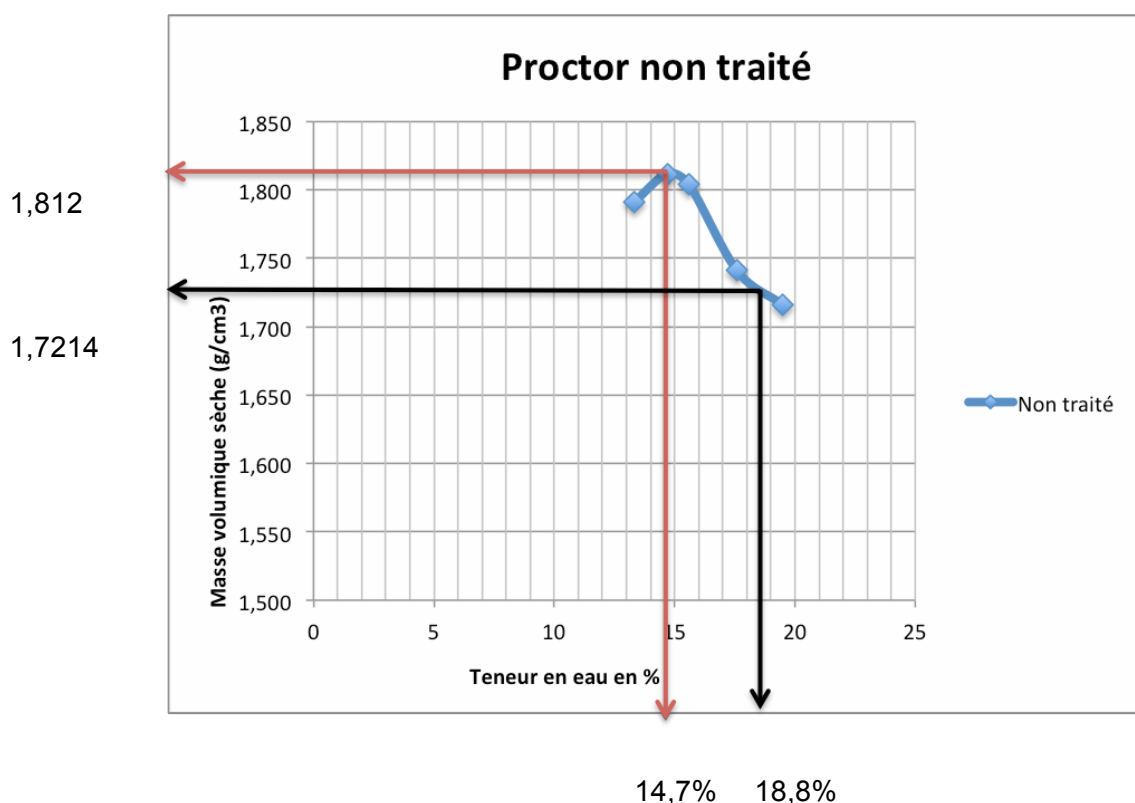
### 1. Essai Proctor

Avec les résultats déjà effectués de l'essai Proctor de notre sol nous avons :

*Limon non traité*

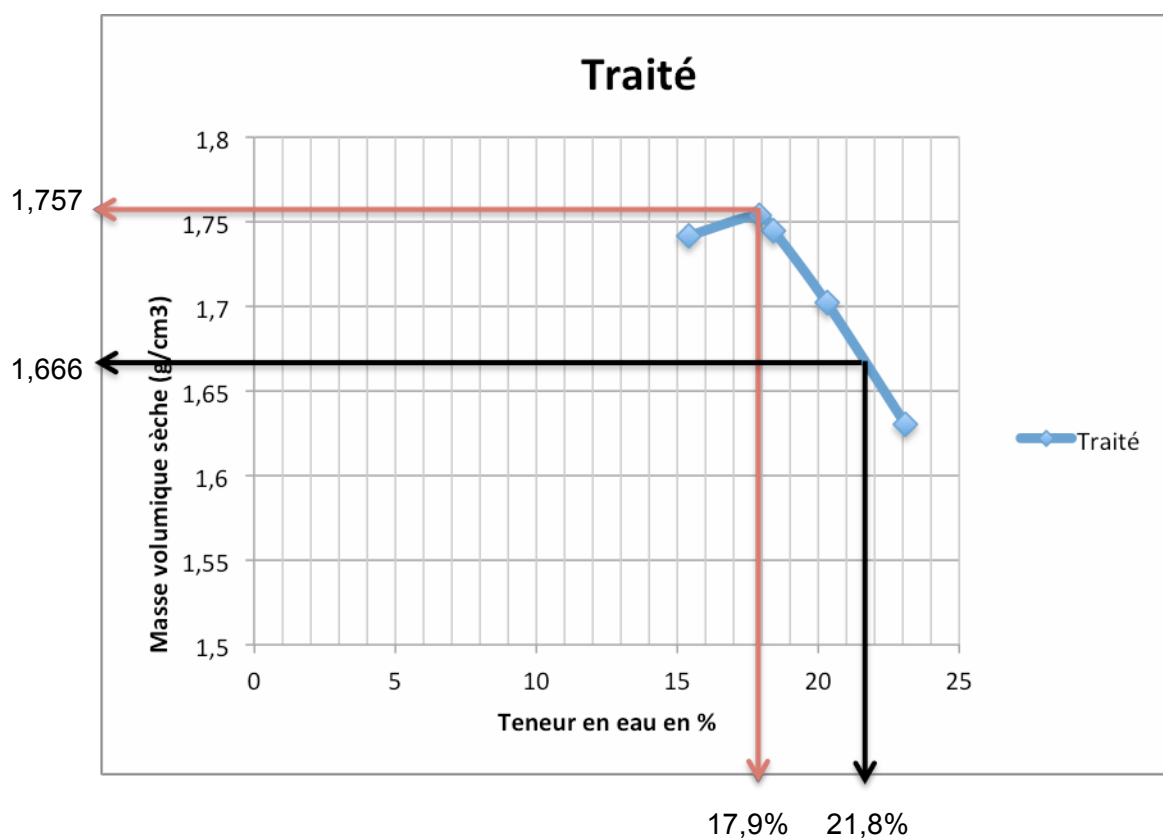
**Limon non traité**

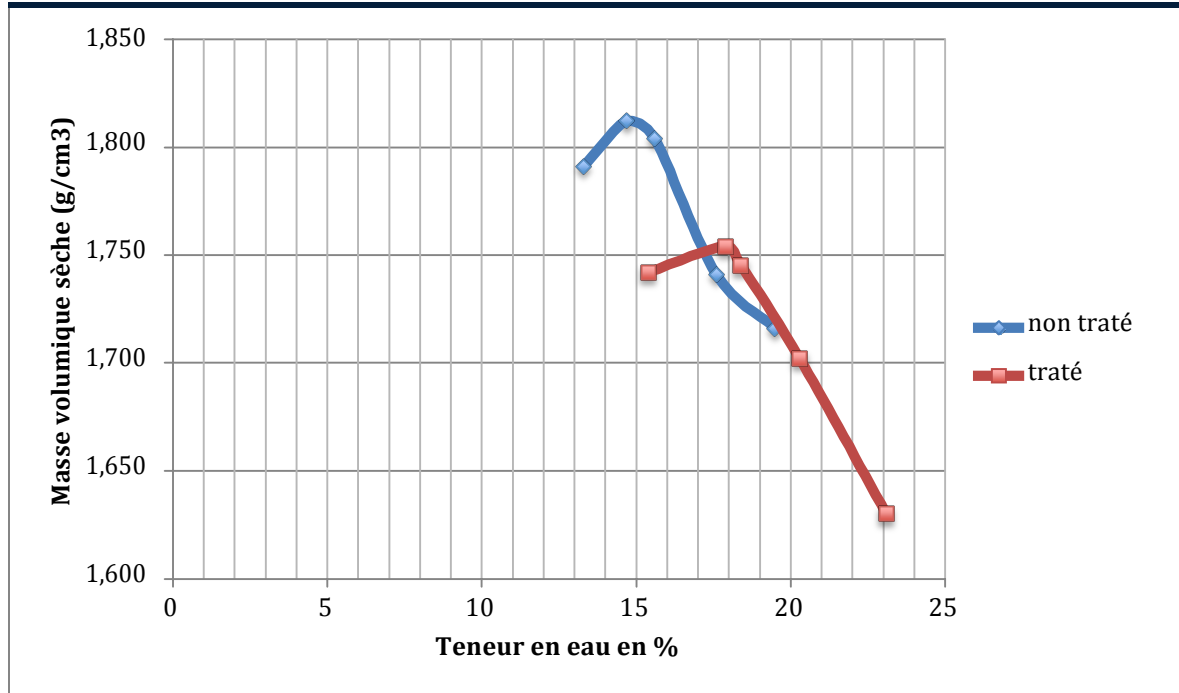
| Teneur d'eau (%) | Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------------------|--------------------------------------------|
| 13,30            | 1,791                                      |
| 14,70            | 1,812                                      |
| 15,60            | 1,804                                      |
| 17,60            | 1,741                                      |
| 19,50            | 1,716                                      |



*Limon traité : **le pourcentage de chaux utilisée est de 2,5 %***

| Limon traité     |                                            |
|------------------|--------------------------------------------|
| Teneur d'eau (%) | Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) |
| 15,4             | 1,742                                      |
| 17,9             | 1,754                                      |
| 18,4             | 1,745                                      |
| 20,3             | 1,702                                      |
| 23,1             | 1,63                                       |





| Type       | 95% optimum Proctor |
|------------|---------------------|
| Traité     | 21,8%               |
| Non Traité | 18,8%               |

## 2. Préparation des échantillons

Le sol est un sol de type A1. Nous déterminons dans un premier temps la teneur en eau du sol et nous la comparons avec la teneur en eau déterminée à l'essai Proctor pour savoir s'il faut humidifier ou sécher le sol.

Pour déterminer la teneur en eau de l'échantillon, nous procédons de la façon suivante : Nous prenons une quantité approximative de sol de 300 grammes que nous mettons à l'étuve pendant 24 heures à une température de 50°C. À partir du poids nous pouvons déterminer la teneur en eau.

| Masse du récipient (g) | Masse humide (matériaux) (g) | Masse sèche (récipient + matériaux) | Masse d'eau évaporée (g) | Masse de sol sec (g) |
|------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| 182,7                  | 302,4                        | 431,4                               | 53,7                     | 248,7                |

$$T_{\text{eau}} = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{sol}}} = \frac{53,7}{248,7} = 21,6\%$$

Avec cette teneur en eau, nous avons pensé que c'est très proche de l'optimum Proctor pour le sol traité à la chaux (21,8%). On a essayé de faire les échantillons traités

directement avec le sol que nous avons, mais après trois tentatives, nous avons abandonné car il était très difficile d'expulser le sol du tube à essai.

Finalement on a procédé de la suivant façon : nous avons séché tout le sol et après on a ajouté l'eau pour obtenir le sol avec la teneur en eau optimale.

La procédure que nous avons utilisée pour la préparation des échantillons est un peu différent pour le triaxial et l'EFA.

### **Pour le Triaxial**

Échantillons réalisés avec une trousse de diamètre 35mm et de hauteur 70mm.

Compactage avec une dame et trois couches.

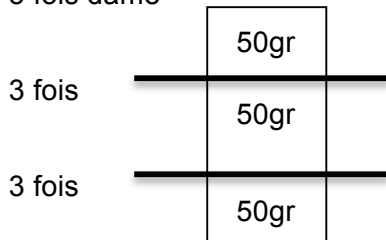
On prend une quantité spécifique de sol, par exemple  $m=150\text{gr}$  et avec le teneur d'eau on calcule le quantité de sol sec et d'eau.

Pour le sol non traité, il faut :  
 $W_{\text{opt } 90\%}=18,8\%$   
 $M_{\text{sèche}}=126,26\text{gr}$   
 $M_{\text{eau}}=23,7\text{gr}$

Pour le sol traité, il faut :  
 $W_{\text{opt } 90\%}=21,8\%$   
 $M_{\text{sèche}}=123,15\text{gr}$   
 $M_{\text{eau}}=26,85\text{gr}$   
 $M_{\text{chaux } 2,5\%}=3,75\text{gr}$

On mélange tous les constituants pour avoir un sol plus au moins uniforme. Pour réaliser l'échantillon avec la trousse, nous avons fait trois couches (on a essayé de faire la même hauteur avec 50g de couche) et pour chaque couche on a compacté quatre fois. Quand on a fini, la dernière couche on a compacté 5 fois avec la dame. Pour avoir un compactage identique, la dame a toujours été utilisée avec une hauteur de chute de 10 cm par rapport à la couche à compacter.

5 fois dame



Remarque : chaque couche était striée sur sa face supérieure pour permettre un meilleur accrochage de la couche suivante.



Figure 16: réalisation d'un échantillon pour l'essai triaxial

### Pour l'EFA

La procédure est similaire que au triaxial mais les dimensions changent.

Le diamètre est de 74 mm et la hauteur varie en fonction du sol disponible, normalement entre 46mm et 54mm.

On prend une quantité spécifique du sol, par exemple  $m=400$  g et avec la teneur en eau on calcule la quantité de sol sec et d'eau.

Pour le sol non traité, il faut :  
 $W_{opt\ 90\%}=18,8\%$   
 $M_{sèche}=336,70\text{gr}$   
 $M_{eau}=63,3\text{gr}$

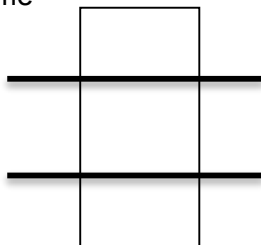
Pour le sol traité, il faut :  
 $W_{opt\ 90\%}=21,8\%$   
 $M_{sèche}=328,4\text{gr}$   
 $M_{eau}=71,59\text{gr}$   
 $M_{chaux\ 2,5\%}=10\text{gr}$

Dans ce cas, la même procédure était utilisée pour le compactage.

5 fois dame

1 fois

1 fois



Que ce soit pour les essais à l'EFA ou pour les essais triaxiaux, une fois préparés, les échantillons étaient retirés du moule puis enveloppés dans un film plastique pour éviter toute évaporation d'eau pendant leur conservation dans une chambre maintenue à une température constante de  $20\pm 2$  °C.

### 3. Essai triaxial

L'objectif principal de l'essai triaxial est la détermination des paramètres de résistance du sol: la cohésion non drainé (CU) et l'angle de frottement interne ( $\phi'$ ).

Le nom triaxial est lié au fait qu'on souhaite contrôler les trois tensions ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ ) et donc être capable d'analyser un état généralisé de tensions. Cependant, les essais triaxiaux qui sont utilisés dans les tests de recherche et de routine actuels ne sont pas des essais triaxiaux dans le vrai sens du terme car ils sont effectués sur des échantillons cylindriques présentant donc une symétrie radiale. Il suffit alors d'appliquer une contrainte axiale (correspondant à la contrainte principale  $\sigma_1 = \sigma_A$ ) et une tension radiale (tensions intermédiaires  $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$ ). La tension verticale est appliquée par l'intermédiaire d'un piston sur la tête de l'échantillon et la tension radiale est la tension ou le confinement de l'échantillon obtenu l'application d'une pression hydrostatique. La différence entre les deux contraintes principales  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  est la contrainte déviateur ( $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ) qui permet la rupture du sol.

La figure 17 montre une représentation schématique du dispositif, où on peut voir que l'échantillon, isolé par une membrane en caoutchouc, est placé dans une chambre qui est remplie d'eau. Ce dispositif permet de réaliser 3 principaux types d'essais :

- essai consolidé drainé CD (essai long – détermination des caractéristiques mécaniques à long terme – sols à perméabilité faible)
- essai non consolidé non drainé UU (essai rapide - détermination des caractéristiques à court terme – sols à grande perméabilité)
- essai consolidé non drainé CU (avec mesure de la pression interstitielle, équivalent à l'essai CD mais moins long)

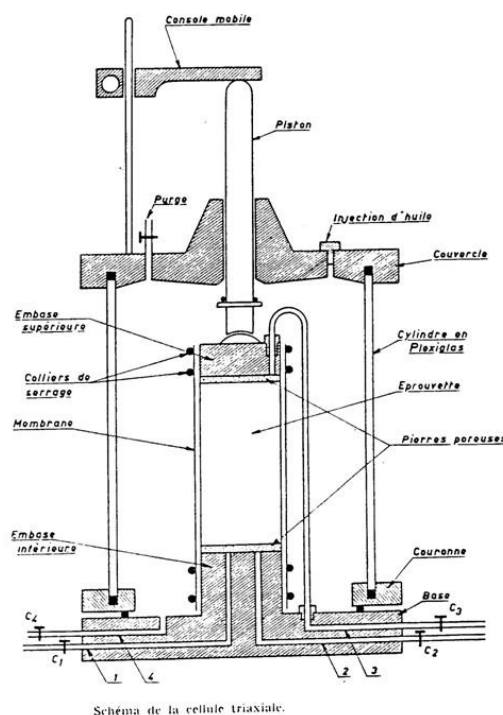


Figure 17 : Schéma essai triaxial

Les essais effectués dans cette étude sont des essais consolidés non drainée (CU): on applique une pression de confinement en laissant la vanne de drainage ouverte pour permettre la consolidation du sol sous cette pression. Pendant la phase de cisaillement, la vanne d'évacuation est fermée. Les résultats sont obtenus en termes de contraintes totales et en terme de contraintes effectives grâce à la mesure de la pression interstitielle lors de l'essai.

### Préparation d'échantillons

Les éprouvettes sont de forme cylindrique dont la hauteur doit être comprise entre 1,5 et 2,0 fois le diamètre. Les échantillons utilisés ont généralement une hauteur de 70 mm ou de 100 mm (3" ou 4", respectivement).

Avant les essais on note le poids, le diamètre et la hauteur de l'échantillon. La base de la cellule doit être nettoyée avec un jet d'air avant le montage de l'échantillon. L'échantillon est placé sur la plaque poreuse qui est à la base de la cellule, avec un diamètre égal au socle. Une membrane en caoutchouc isole l'échantillon de l'eau de la cellule. La mise en place de la membrane est effectuée à l'aide d'un tube en laiton creux avec un diamètre intérieur légèrement supérieur au diamètre de l'échantillon et de hauteur similaire. A l'aide de succion, la membrane adhère au tube, l'échantillon est placé dans celui-ci et la membrane adhère parfaitement à l'échantillon quand on arrête la succion. On doit être prudent à ne pas laisser les bulles d'air pénétrer entre la membrane et l'échantillon.

Des joints toriques permettent de fixer la membrane autour du socle ainsi que sur le chapeau posé sur l'éprouvette de sol.

En plaçant la cellule, on doit ajuster légèrement la position de l'échantillon pour s'assurer qu'il est n'est pas désaxé par rapport au piston.

### Exécution de l'essai

L'essai triaxial comprend trois phases: (i) de la phase de saturation, (ii) la phase de consolidation et (iii) la phase de cisaillement. La phase de consolidation est réalisée avec le drainage ouvert et la phase de cisaillement est non drainée dans les essais consolidés non-drainés (CU).

#### (I) Phase de saturation

Cette phase est obligatoire dans les essais saturés. Le sol doit être complètement saturé (avec 95% de saturation minimum). En effet, la présence de bulles d'air (plus compressibles que l'eau et les minéraux du sol) risque d'affecter les résultats.

La vérification de la saturation est effectuée par la mesure du paramètre de Skempton B puisque ce paramètre est similaire au taux de saturation pour des valeurs supérieures à 98%.

L'expression de Skempton est donnée par l'équation 1, où A et B sont les paramètres Skempton,  $\Delta u$  est le changement de la pression interstitielle et  $\Delta\sigma_1$  et  $\Delta\sigma_3$  sont les variations de contraintes verticale et de confinement, respectivement.

$$\Delta u = A (\Delta\sigma_1 - B (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)) \quad (1)$$

Pour faciliter le calcul, le paramètre B est obtenu en mesurant le changement dans la pression interstitielle provoquée par l'application d'une faible variation de  $\Delta\sigma_3$ , pression de confinement (par exemple  $\Delta\sigma_3 = 50$  kPa). Dans ce cas, l'équation 1 se transforme et devient l'équation 2 (pour que le sol soit totalement saturé, mesuré le changement de la pression interstitielle doit être égale à la variation de la pression de confinement).

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} \quad (2)$$

La saturation peut être effectuée par contre-pression, qui correspond à l'application d'une pression d'eau à l'intérieur de l'échantillon. Cela permet de forcer la circulation de l'eau en créant un gradient de pression à l'intérieur de l'échantillon.

Il faut être prudent et faire en sorte que la pression de l'eau appliquée soit toujours inférieure à la pression de confinement (appliquée à l'échantillon de l'extérieur).

Cette phase est généralement longue et dépend de la perméabilité du sol. Pour les sols argileux, elle peut durer plusieurs semaines.

## (II) Phase de consolidation

La consolidation est généralement isotrope, ce qui signifie qu'on applique une pression de confinement seule (Fig. 2a). Cette pression est la même dans toutes les directions car elle est appliquée avec une augmentation de la pression de l'eau dans la cellule.

Lors de phase, l'objectif est de définir l'état de contrainte initial du sol en termes de contraintes effectives. Une fois le sol complètement saturé, la contrainte appliquée (pression totale) est égale à la contrainte effective car on permet le drainage de l'eau, ce qui entraîne la dissipation de l'excès de pression interstitielle. La phase de consolidation est terminée lorsque l'excès de pression interstitielle disparaît.

## (iii) Phase de coupe

L'essai le plus courant consiste à cisailer l'éprouvette de sol par application d'une compression axiale (augmentation de la contrainte verticale  $P/A$  en maintenant une pression de confinement constante - Figure 2b). La différence entre les deux contraintes principales est le déviateur  $q$  correspond à l'application de la contrainte de cisaillement (Fig. 2c).

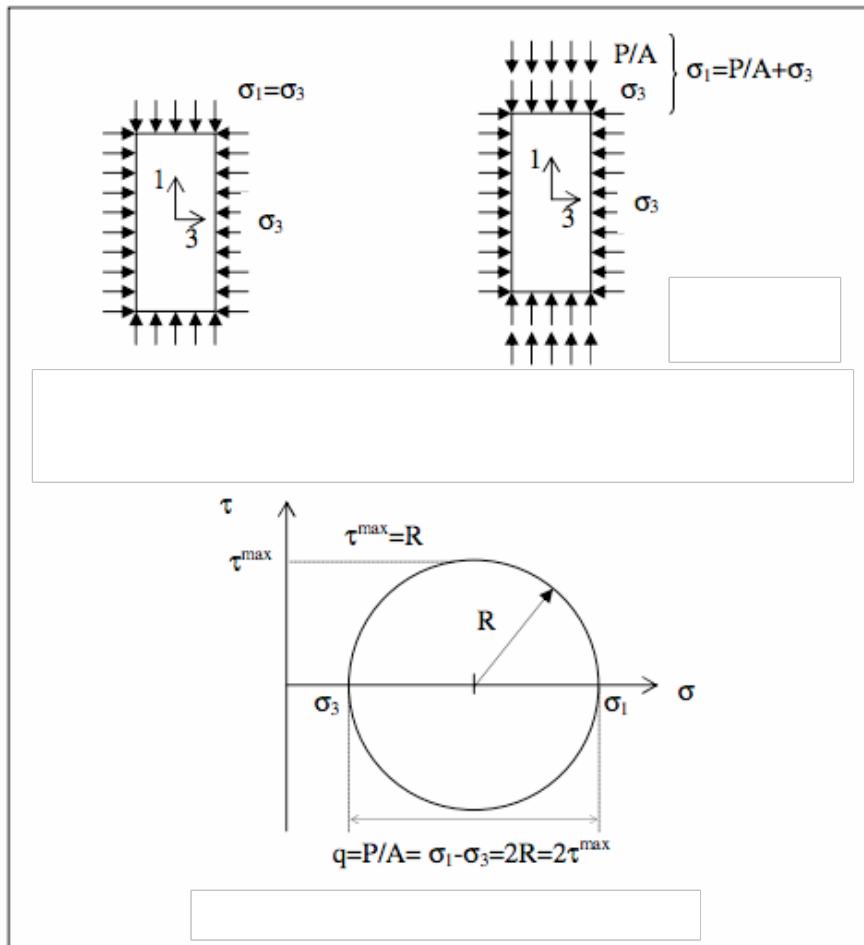


Figure 18 : en ordre (a) phase de consolidation, (b) phase de cisaillement (contrainte verticale accrue en maintenant constante la pression dans la cellule) et c) cercle de Mohr au cours de la phase de cisaillement.

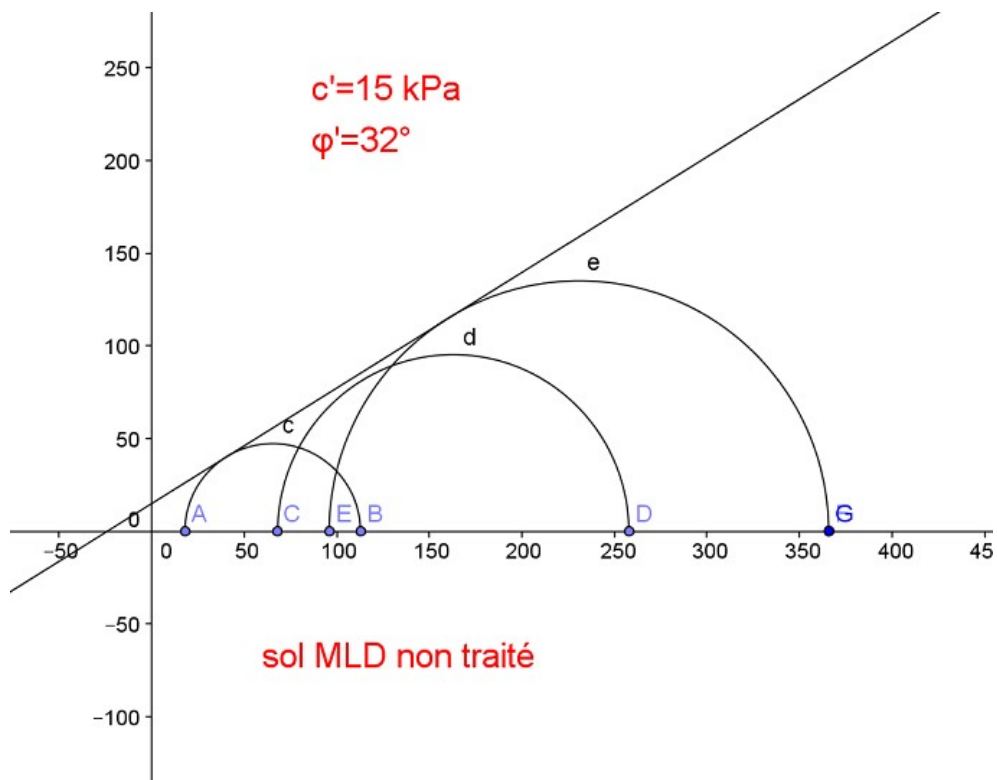
### Résultats

Le but de cet essai est la vérification des propriétés mécaniques du sol et la possible corrélation avec les résultats de l'essai.

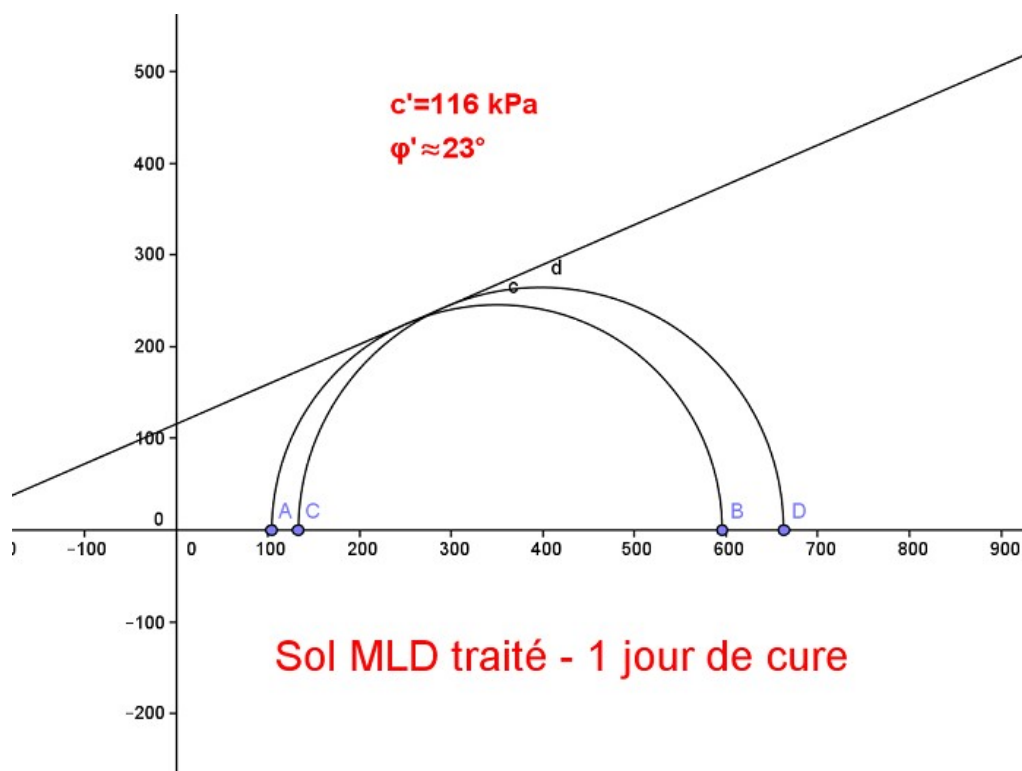
La durée d'un essai étant de l'ordre de 3 à 4 jours, nous avons prévu la réalisation d'un essai par semaine. Quelques problèmes ont été rencontrés lors de la réalisation des essais, tels que des fuites d'eau des contrôleurs de pression.

Les principaux résultats concernent la cohésion effective et l'angle de frottement interne effectif. La définition du point de rupture est encore un objet d'étude. On a trois choix possibles : (i) lorsque le déviateur  $q$  commence à diminuer après le pic; (ii) en cas de renversement du sens de variation de la pression interstitielle; ou (iii) où lorsque la déformation axiale atteint 15% ou 20% de déformation. Les courbes du déviateur en fonction de la déformation axiale obtenues ne présentant pas de pic, nous avons pris comme critère la limite de 20% de déformation axiale. Les valeurs de la contrainte de confinement  $\sigma_3$  ont été fixées pour les trois essais à 50 kPa, 100 kPa et 200 kPa pour l'ensemble des configurations : sol non traité, sol traité à 1 jour, à 7 jours, à 28 jours et à 90 jours.

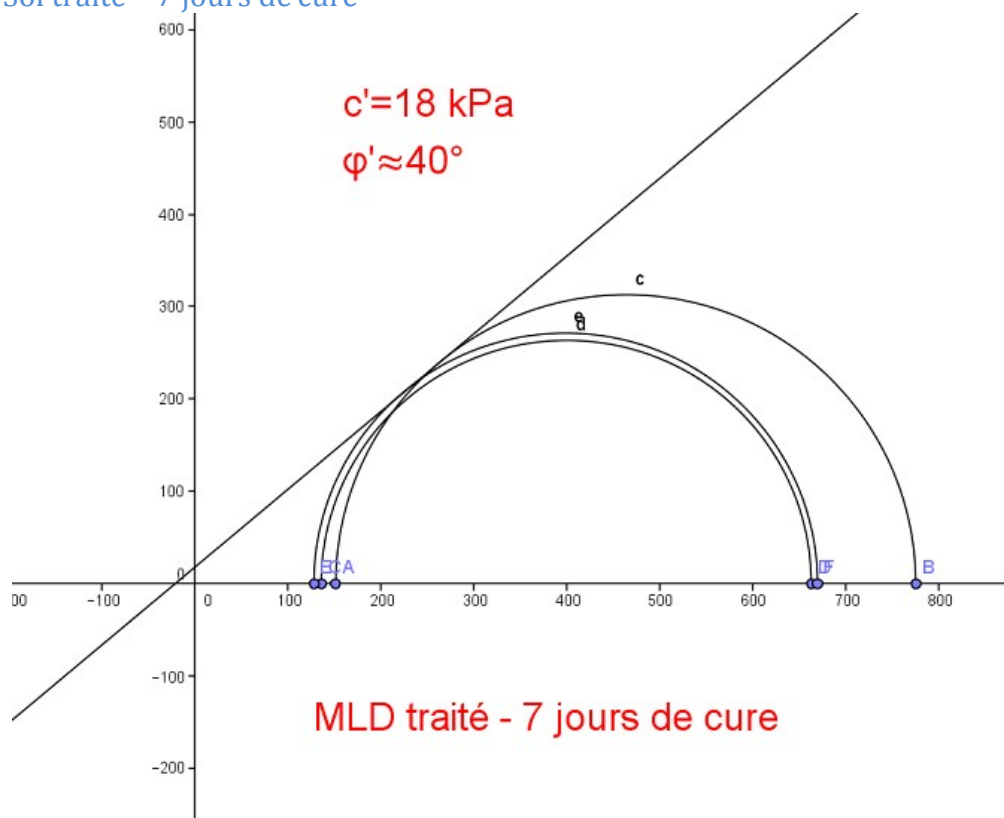
- Sol non traité



- Sol traité – 1 jour de cure



- Sol traité - 7 jours de cure



- Sol traité - 28 jours de cure

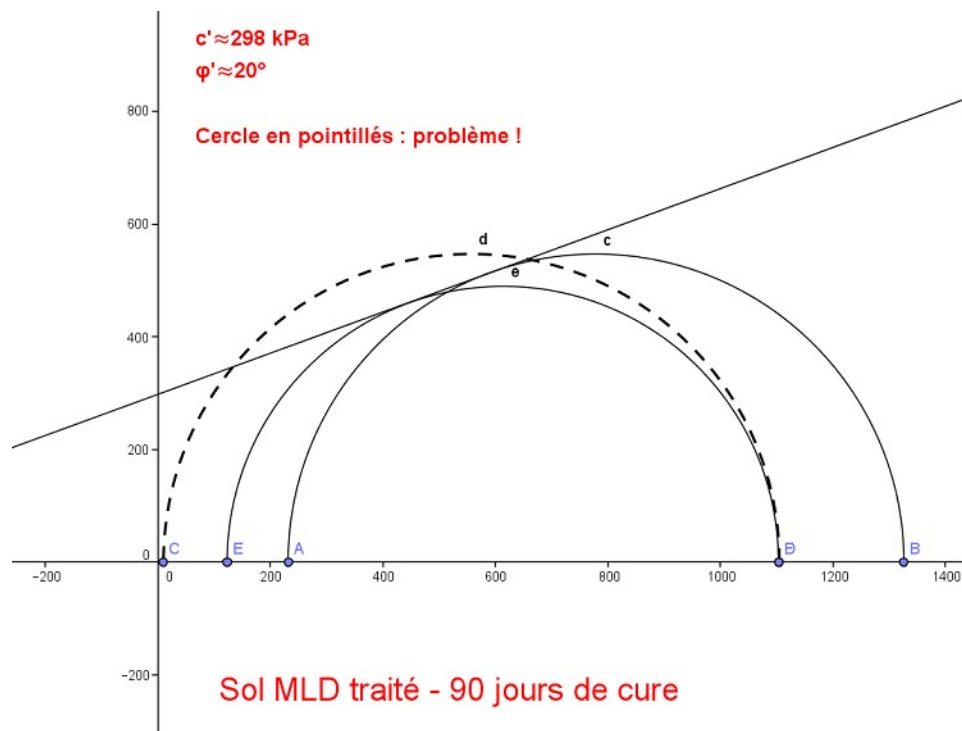


Tableau récapitulatif

|                           | Cohésion (kPa) | Angle de frottement $\varphi$ |
|---------------------------|----------------|-------------------------------|
| Non traité                | 15             | 32°                           |
| Traité - 1 jour de cure   | 116            | 23°                           |
| Traité - 7 jours de cure  | 18             | 40°                           |
| Traité - 90 jours de cure | 298            | 20                            |

Analyse des résultats :

Les résultats obtenus appellent plusieurs commentaires.

- Les valeurs trouvées pour la cohésion et l'angle de frottement interne effectifs semblent cohérentes et similaires à des valeurs trouvées dans la littérature, avec cependant des variations relativement importantes de l'angle de frottement interne.
- Pour le sol traité, nous avons indiqué plus haut que nous avons rencontré des difficultés lors de la réalisation des essais.
- Nous pensons que cela a eu un impact certain sur les résultats. En effet, Les valeurs de la cohésion effective nous semblent anormalement élevées pour le sol traité et soumis à l'essai CU après un jour de cure. De plus, nous pouvons difficilement faire confiance à ce résultat sur la base de deux cercles de Mohr seulement.
- Les essais réalisés après 7 jours de cure donnent eux aussi des résultats douteux avec une cohésion qui ne semble pas augmenter par rapport à celle du sol non traité. Là aussi, nous avons beaucoup de doute sur la validité de ces résultats. Nous constatons également que deux essais réalisés avec des contraintes de confinement différentes donnent deux cercles de Mohr extrêmement rapprochés.
- Enfin, pour le sol traité à 90 jours, on s'attendait à une augmentation de la cohésion, mais la valeur indiquée ne peut pas être considérée comme sûre. Il y a au moins un essai qui n'est pas fiable.

Pour l'ensemble de ces raisons, nous pensons qu'il est nécessaire de réaliser de nouveaux essais. Nous avons d'ailleurs préparé des éprouvettes qui sont actuellement en cure.

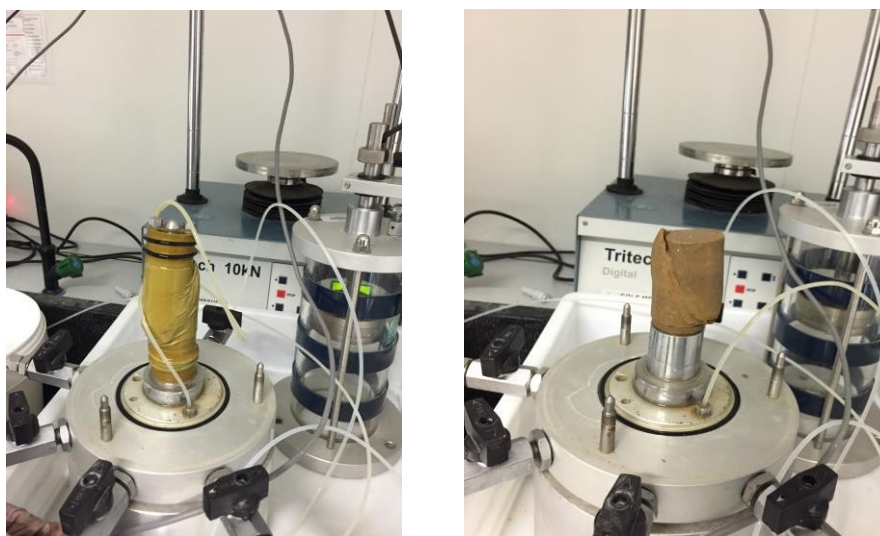


Figure 33: Exemple d'un échantillon cisailé

## 4. Essai EFA

### Présentation de l'essai

L'EFA (Erosion Fonction Apparatus) permet de mesurer l'érosion d'un sol par l'action de cisaillement provoquée par l'écoulement de l'eau. Il a été développé au début des années 1990 pour J.L. Briaud de l'université de Texas A&M.

Cet appareil consiste à faire écouler l'eau sur une couche de 1mm de sol. En établissant un écoulement avec des vitesses différentes on vérifie l'érosion de cette couche selon une procédure détaillée : on commence par une vitesse faible, s'il n'y a pas d'érosion au bout d'une heure, on augmente la vitesse et on établit à nouveau l'écoulement. Lorsque le millimètre de sol est érodé, on pousse l'échantillon dans le conduit horizontal et on recommence l'opération avec une vitesse plus grande, et ainsi de suite jusqu'à obtenir un nombre suffisant de points permettant de tracer la courbe de la fonction d'érosion.

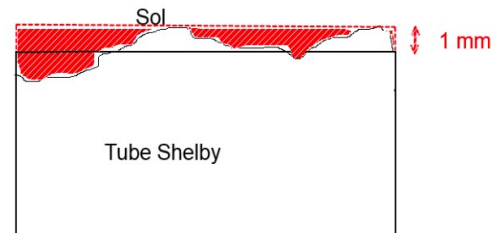


Figure 34 : Tube Shelby contenant l'échantillon de sol

La fonction d'érosion est la courbe représentative du taux d'érosion en fonction de la vitesse d'écoulement ou de la contrainte de cisaillement. La contrainte critique de cisaillement est la valeur de contrainte de cisaillement à partir de laquelle commence l'érosion.

L'érodabilité initiale indique la rapidité avec laquelle le sol commence à s'éroder. Pour chaque vitesse d'écoulement ( $v$ ), le taux d'érosion est obtenu en divisant la hauteur du sol érodé par le temps nécessaire à l'érosion :

$$z = \frac{h}{t}$$

La hauteur  $h$  est de 1 mm et le temps  $t$  est le temps nécessaire à son érosion.

La contrainte de cisaillement est déterminée par l'équation ci-dessous :

$$\tau = \frac{1}{8} \cdot f \cdot \rho \cdot v^2$$

où :

$\rho$  est la masse volumique de l'eau qui dépend de la température de l'eau au moment de l'essai, mais on peut prendre la valeur de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

$v$  est la vitesse moyenne de l'eau.

$f$  est le coefficient de frottement qui dépend de divers facteurs :

-Du nombre de Reynolds  $Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$  où  $\nu$  est la viscosité cinématique de l'eau qui dépend de la température,  $v$  est la vitesse moyenne dans la conduite et  $D$  est le diamètre équivalent.

| Température de l'eau (°C) | Viscosité cinématique de l'eau $\nu$ (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>-6</sup> |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 14                        | 1,174                                                                       |
| 15                        | 1,141                                                                       |
| 16                        | 1,115                                                                       |
| 17                        | 1,088                                                                       |
| 18                        | 1,061                                                                       |
| 19                        | 1,034                                                                       |
| 20                        | 1,005                                                                       |
| 21                        | 0,985                                                                       |
| 22                        | 0,963                                                                       |
| 23                        | 0,941                                                                       |
| 24                        | 0,919                                                                       |
| 25                        | 0,896                                                                       |

-La rugosité  $\frac{\varepsilon}{D}$  où :

- $\varepsilon = 0,5D_{50}$  est le rayon moyen des grains du sol, le facteur 0,5 est utilisé parce qu'il est supposé que la moitié supérieure de la particule pénètre dans la circulation du flux pendant que la moitié inférieure est enterrée dans la masse du sol.

|                       | Non traité | Traité 1, 7 et 28 jours | Traité 90 jours |
|-----------------------|------------|-------------------------|-----------------|
| <b>D<sub>50</sub></b> | 0,03mm     | 0,04mm                  | 0,06mm          |

- $D = 4A/P$  où  $A$  est la section de l'écoulement et  $P$  est le périmètre mouillé.  
Dans le cas d'une section rectangulaire :

$$D = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad (a \text{ et } b \text{ sont les dimensions des côtés du rectangle})$$

Pour l'appareil EFA :  $a = 101,6 \text{ mm}$  ;  $b = 50,8 \text{ mm} \rightarrow D = 67,7 \text{ mm}$

Avec ces facteurs on peut trouver le coefficient de frottement et il y a deux possibilités :

- Avec l'abaque de Moody :

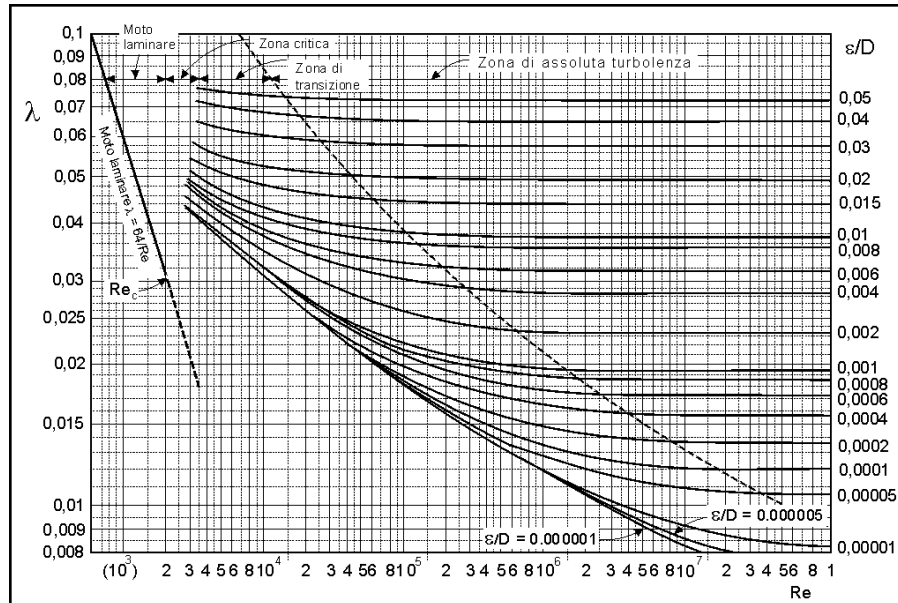


Figure 35 : Abaque de Moody

- Avec la résolution de l'équation de Colebrook. Il y a logiciels qui permettent de calculer les valeurs.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left[ \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right]$$

### Préparation des échantillons

Les éprouvettes sont de forme cylindrique avec un diamètre égale à 74 mm. Pour chaque échantillon on a utilisé 400g de sol, pour cette raison la hauteur varie en fonction du sol disponible, normalement entre 46mm et 54mm. Les échantillons ont été stockés dans une chambre de température constante de 20° C.

L'échantillon est placé dans un tube shelby dont la surface intérieure des parois est préalablement graissée, cela pour faciliter la mise en place, puis le tube est installé dans l'appareil de façon à pousser l'éprouvette de sol dans le conduit horizontal (elle pénètre de 1 mm dans la conduite).

### Exécution de l'essai

Après la préparation d'échantillon, on doit mettre en route la pompe pour établir l'écoulement dans la conduite. Avec la manivelle on peut choisir le débit d'eau. On doit monter 1mm de l'éprouvette (pilotage à partir d'un ordinateur). Au début, on doit mettre l'échantillon à une vitesse inférieur à 0,30 m/s pendant une heure. Par la suite, on peut choisir différentes vitesses adaptées au type de sol. S'il n'y a pas d'érosion pendant une heure, on doit augmenter la vitesse d'écoulement. Entre chaque vitesse on doit arrêter l'essai, araser le sol et le remettre dans la conduite. Si les éprouvettes sont plus compactes

la vitesse d'eau doit être plus importante. Un essai complet dure presque une journée entière.

### Résultats EFA

Les résultats sont exprimés à partir de graphiques qui donnent le taux d'érosion du sol en fonction de la contrainte de cisaillement et aussi en fonction de la vitesse d'écoulement de l'eau dans la conduite.

*Pour une facile compression et analyse des résultats, on a regroupé tous les essais des mêmes caractéristiques, c'est-à-dire, si pour chaque temps de cure on a fait deux éprouvettes les résultats montrés seront dans le même graphique. Nous avons réalisé 12 essais avec l'EFA :*

- 4 échantillons pour le sol non traité :*
- 2 échantillons pour le sol traité - 1 jour de cure*
- 2 échantillons pour le sol traité - 7 jours de cure*
- 2 échantillons pour le sol traité - 28 jours de cure*
- 2 échantillons pour le sol traité - 90 jours de cure*

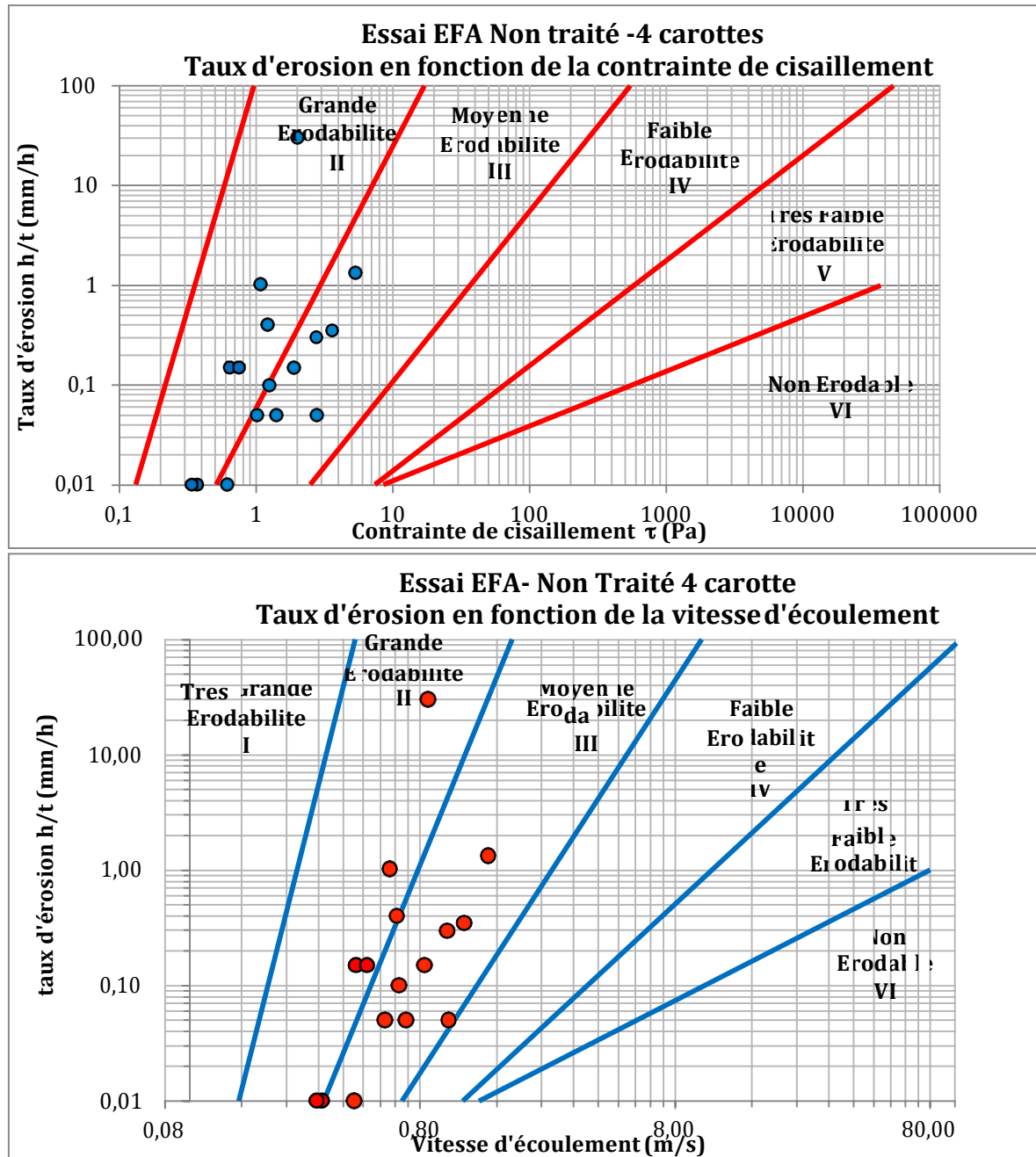
Ci-dessous, on présente, comme exemple, l'évolution de l'essai pendant au cours du temps d'un échantillon de sol non traité à la vitesse de 0,65m/s à 0min, 15min, 30min et 35min respectivement.



*Figure 37 : l'évolution de l'érosion pendant la réalisation d'un essai EFA*

### -Sol non traité

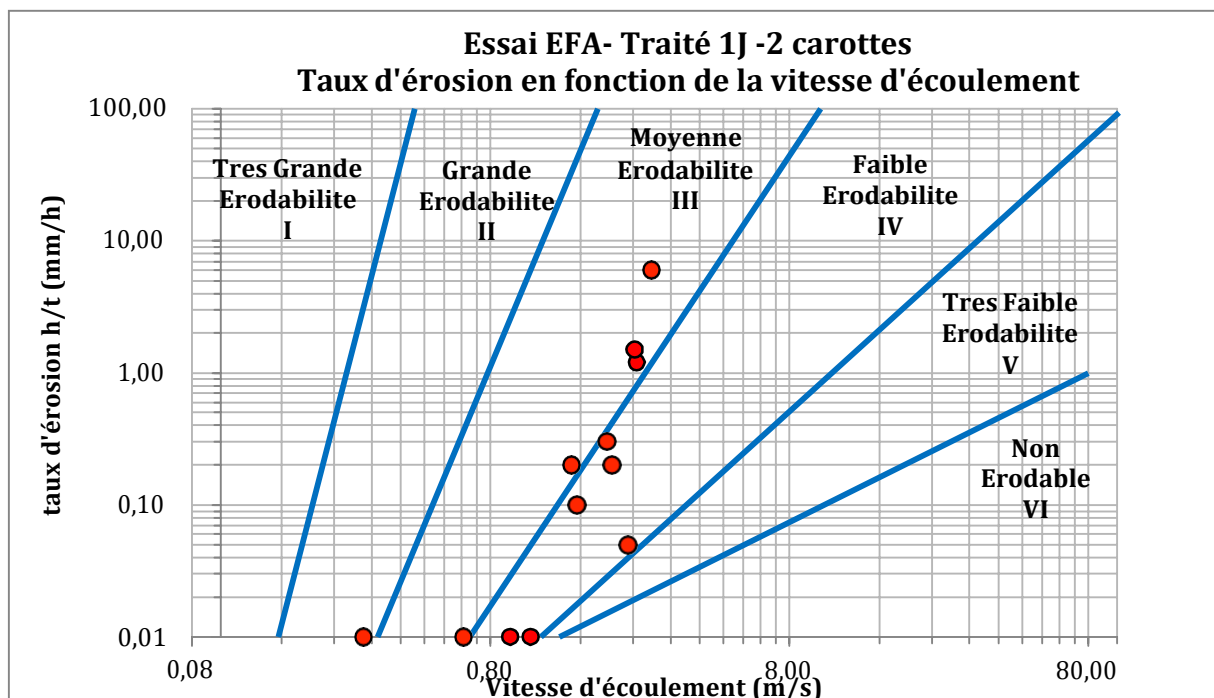
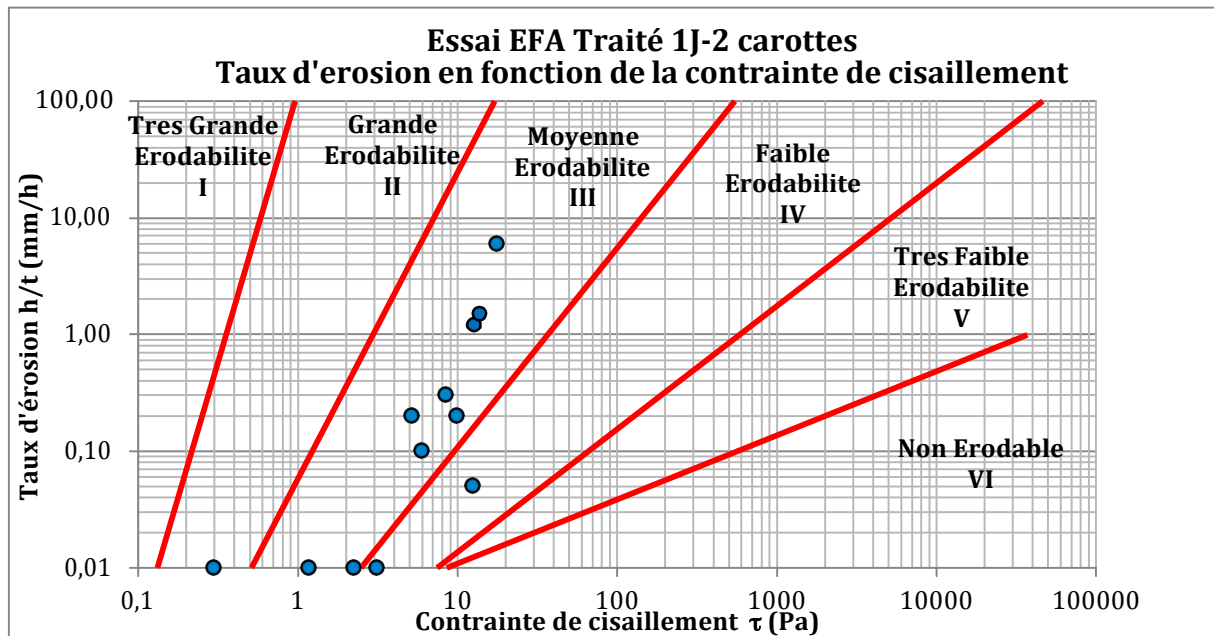
Pour le sol non traité, à la différence du sol traité, on a réalisé quatre essais EFA et on a obtenu les graphiques suivants :



On observe une concentration de valeurs entre les catégories grande et moyenne érodabilité. Les valeurs sont regroupées à la frontière des deux catégories. Quelquefois nous avons écarté des résultats qui nous semblaient trop incohérents. Dans un des essais par exemple, avec une vitesse de 1,5 m/s toute l'épaisseur de sol a été érodée, alors qu'avec une vitesse de 0,45m/s, pendant une heure, on a eu de l'ordre de 90% d'érosion.

Nous pensons que cela est dû au fait que le millimètre de sol qui subissait l'écoulement se trouvait à la jonction de deux des trois couches de sol compactées pour préparer l'éprouvette.

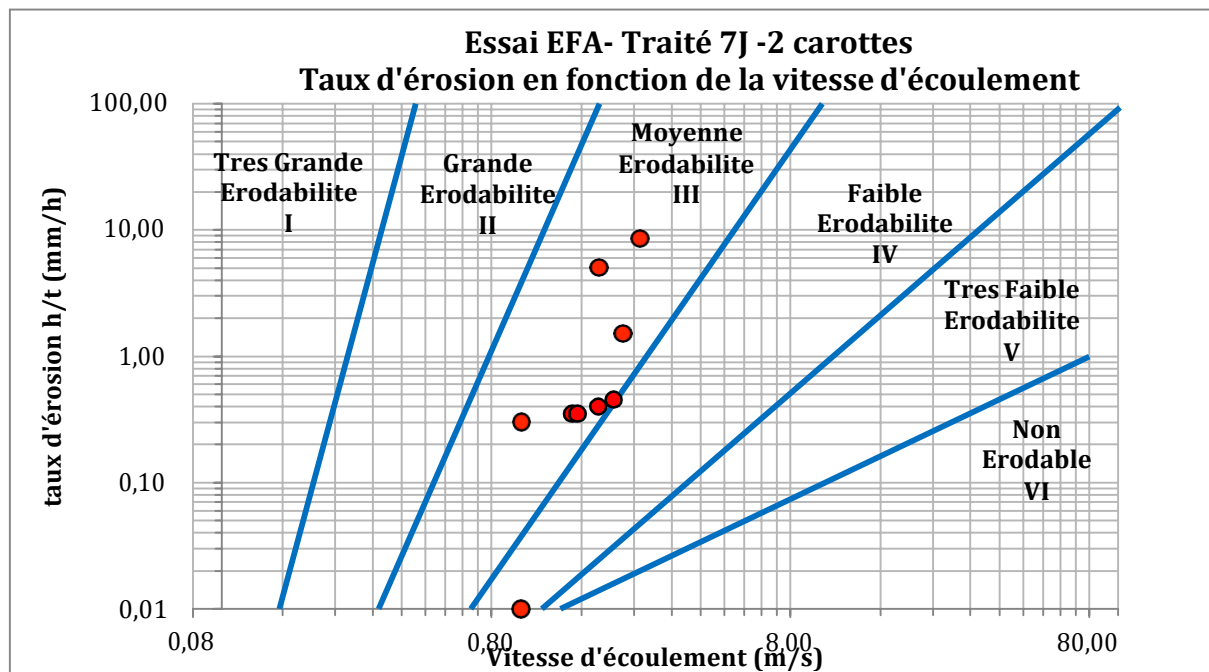
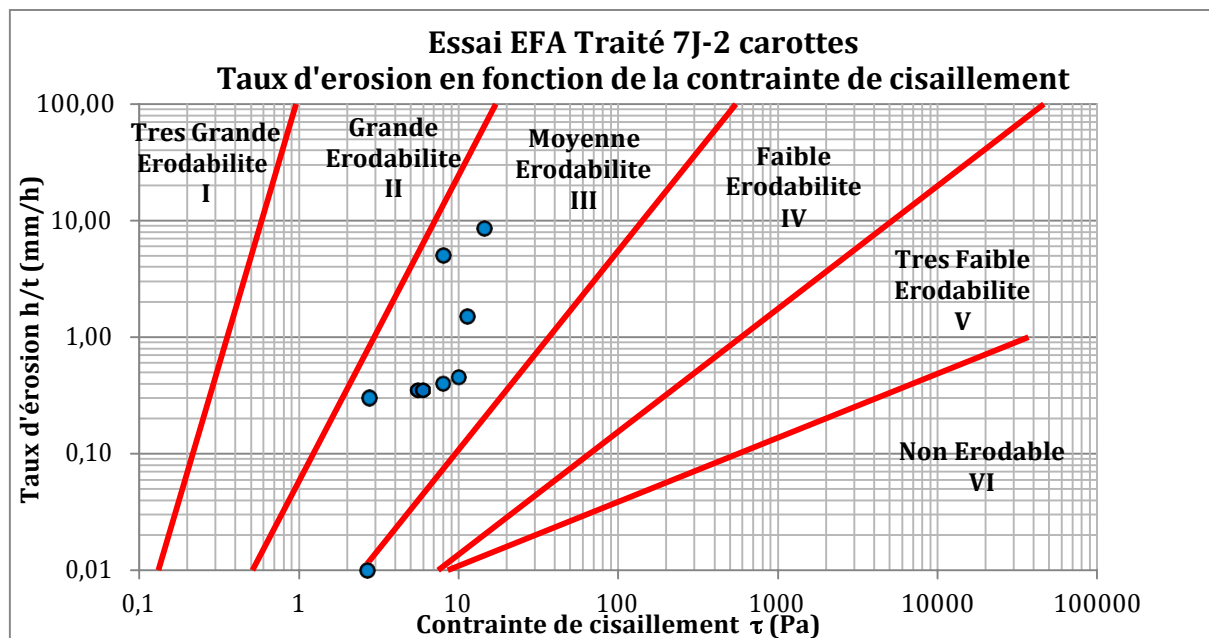
*-Sol traité - 1 Jour de cure*



Avec les essais réalisés avec le sol traité à la chaux, on commence à voir la progression vers la droite, c'est-à-dire vers les catégories de plus faible érodabilité, des courbes d'érosion. Dans le cas présent, la courbe est située entre les catégories de moyenne et faible érodabilité. Le traitement a donc un effet sur l'érodabilité des sols. Avec un temps

de cure d'un jour, la vitesse nécessaire pour éroder un millimètre de l'échantillon est plus ou moins 2,5 m/s à différence du sol non traité qui a besoin uniquement de 0,65m/s.

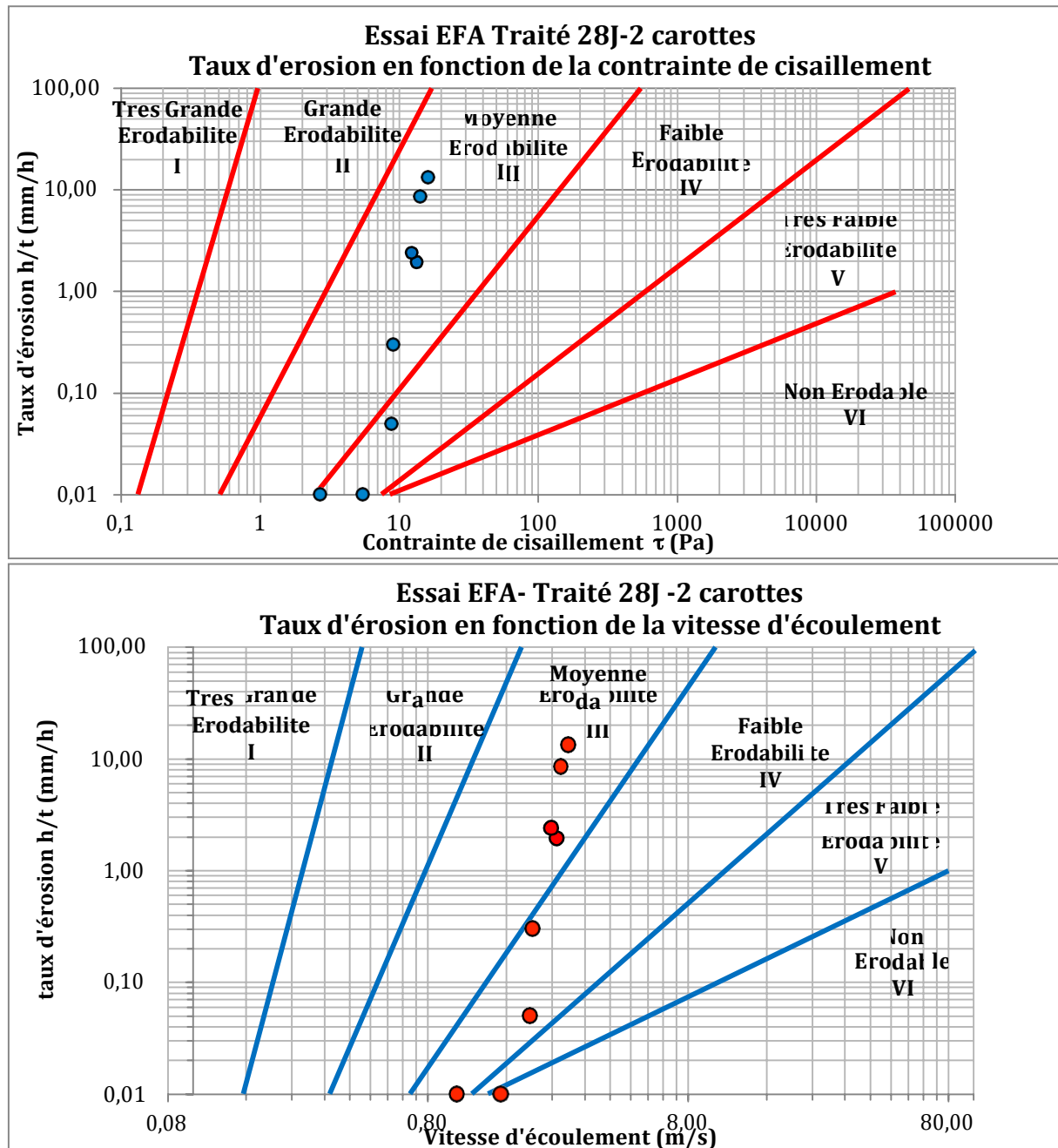
*-Sol traité 7 Jours*



À partir de 7 jours, il y a une stabilisation de l'érodabilité et les valeurs sont celles d'une érodabilité moyenne. La vitesse produisant le maximum d'érosion se situe entre 2m/s et 2,5m/s. Dans une des carottes, on a observé qu'avec une vitesse 2,5m/s en 7min, il y a eu une érosion totale mais avec 2,2m/s on a eu besoin de 40min pour obtenir la même

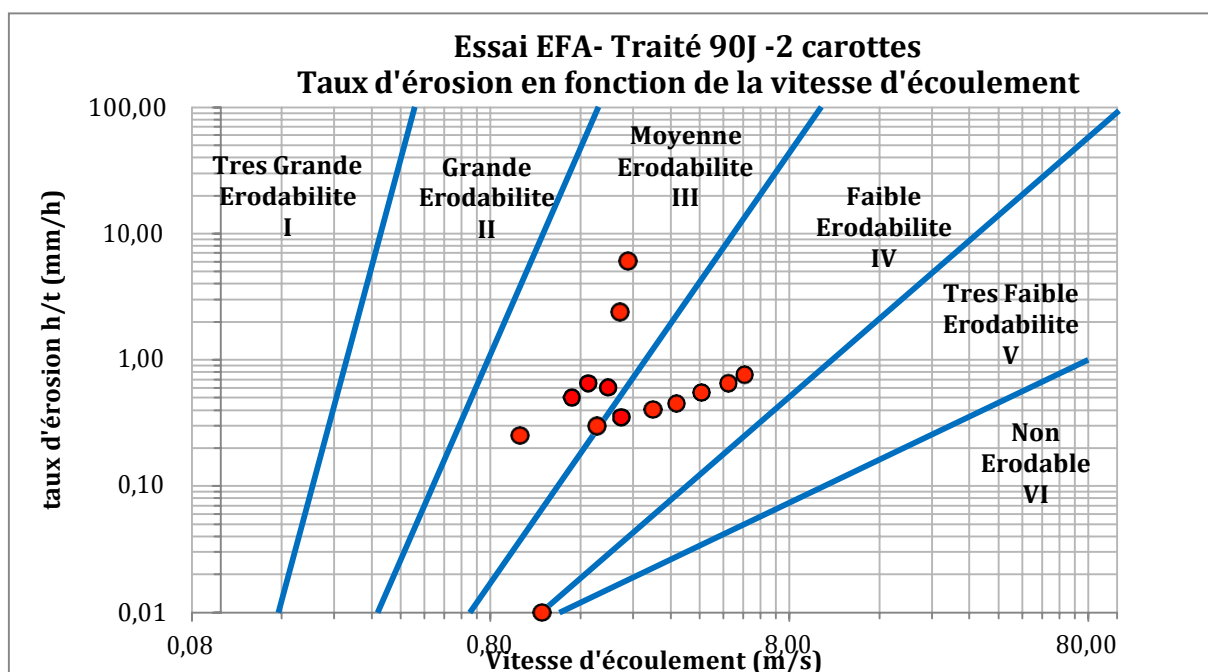
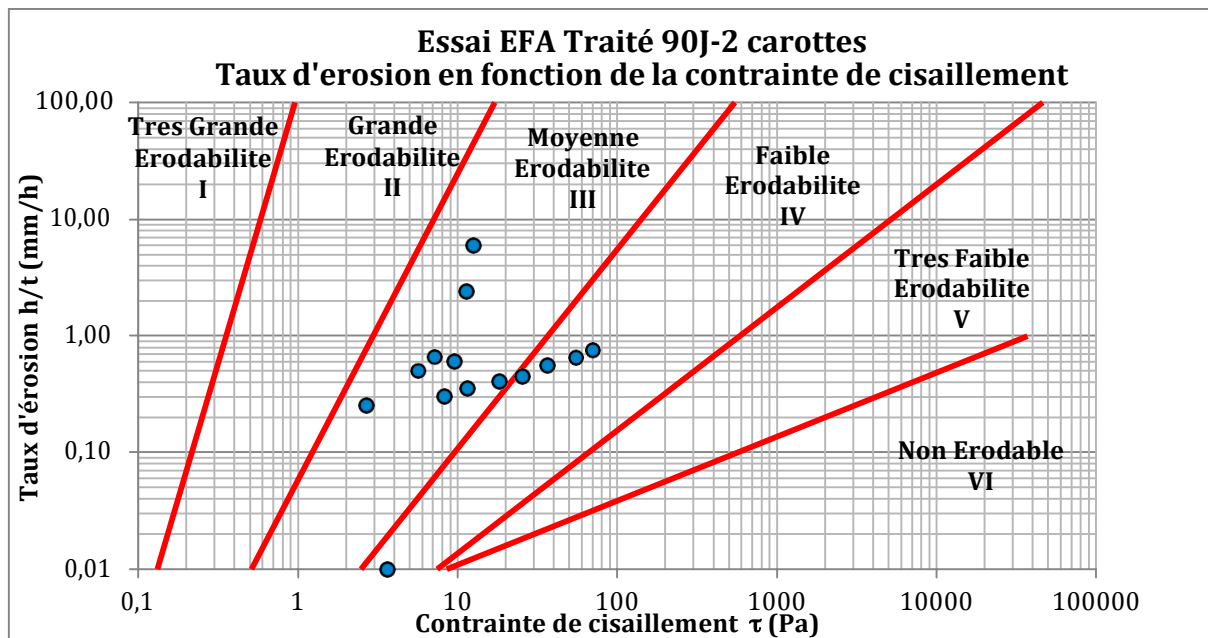
érosion. Comme pour le cas indiqué précédemment pour le sol non traité, ce résultat a été écarté.

*-Sol traité - 28 Jours de cure*



On a observé que la vitesse d'écoulement nécessaire a augmenté un peu par rapport aux cas précédents. Il était nécessaire de monter à une vitesse allant de 2,6 à 2,8m/s pour avoir 100% d'érosion d'un millimètre de l'échantillon.

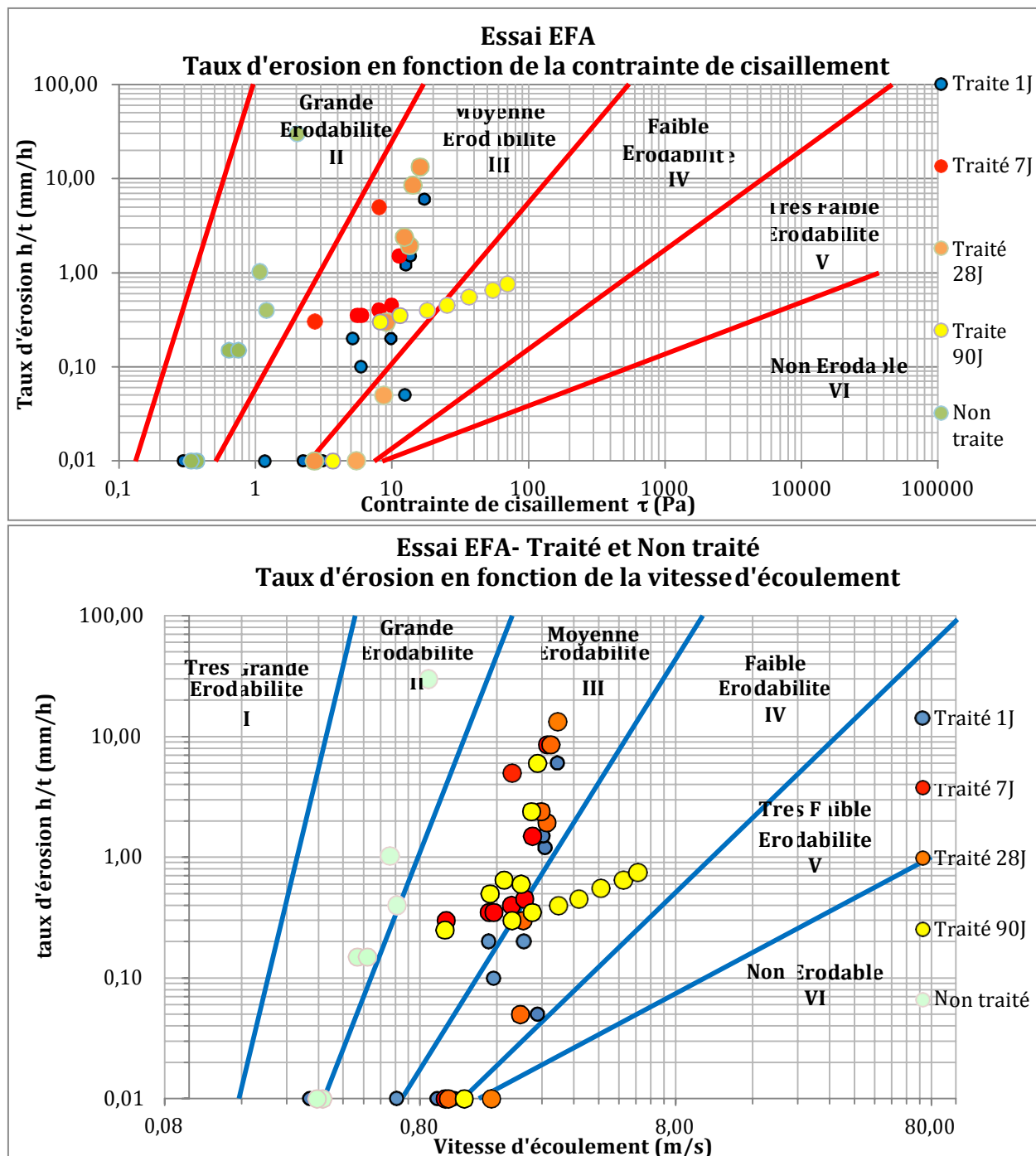
-Sol traité - 90 Jours de cure



Le dernier essai a été réalisé sur des sols ayant subi une cure de 90 jours après leur traitement. On peut voir une progression plus notable vers la droite de la courbe d'érosion. Le sol peut être classé dans la catégorie « faible érodabilité » avec application de vitesses importantes. Ici, on a deux résultats différents qu'il faut commenter. Dans une des carottes, la vitesse maximum pour obtenir l'érosion théorique a été de 2,35m/s. Ce cas est représenté dans le graphique pour la majorité de valeurs qui se trouvent dans la

catégorie « moyenne érodabilité ». Dans l'autre carotte, à 5,65 m/s, seulement 70% d'érosion du millimètre de l'échantillon a été atteinte. Les deux valeurs sont très différentes et cela est probablement dû à un mauvais compactage. Il faudrait réaliser un troisième essai avec 90 jours de cure pour vérifier ces résultats.

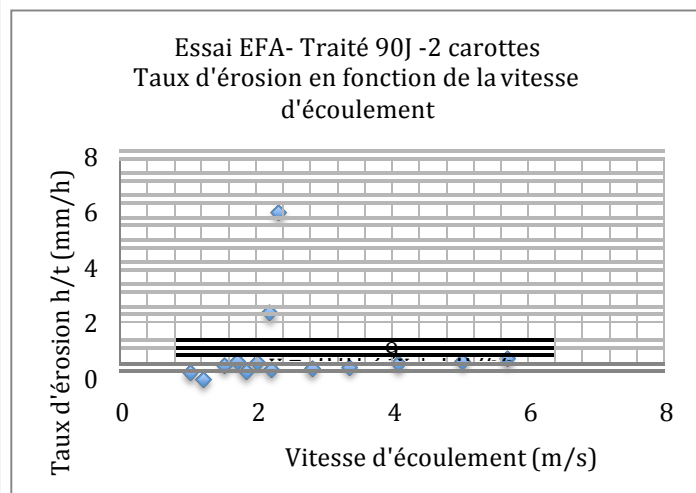
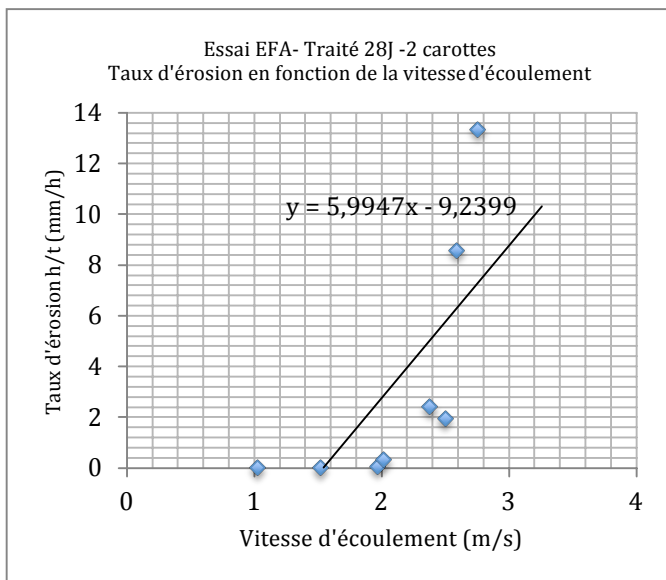
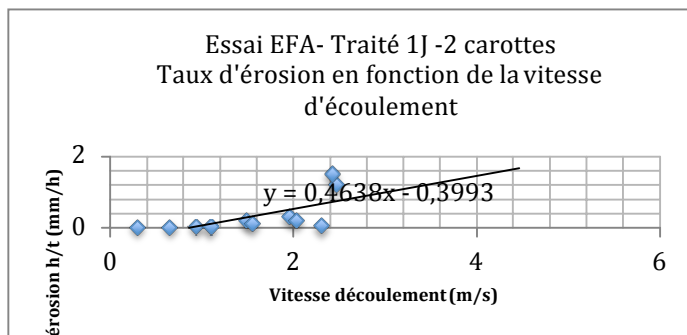
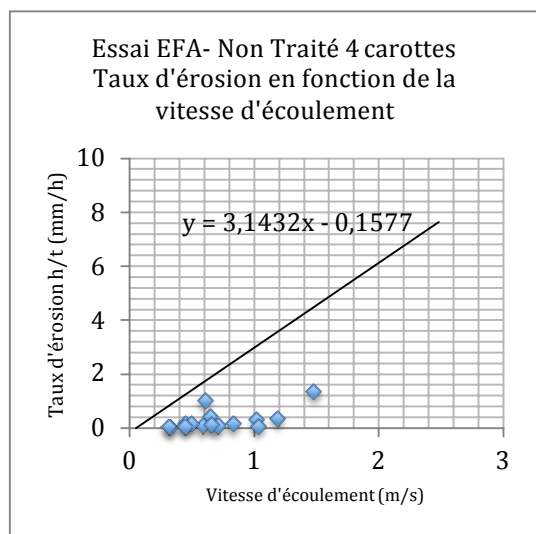
- Résultats d'ensemble

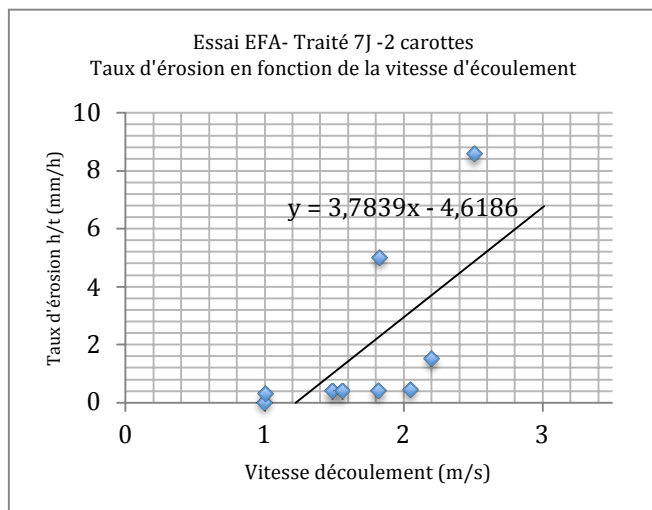


Ces deux derniers graphiques sont la compilation de toutes les résultats de l'essai EFA. On peut plus facilement voir l'évolution de l'érodabilité en fonction du traitement et du temps de cure. Le sol non traité est situé dans la région de grande érodabilité, par contre, le sol

traité est dans la zone de moyenne érodabilité mais on constate qu'avec une cure de 90 jours le sol augmente sa résistance et les valeurs sont dans la zone de faible érodabilité. On peut affirmer que le traitement à la chaux provoque une amélioration de la résistance à l'érosion du sol.

À partir des résultats obtenus, nous pouvons tracer les droites tangentes aux courbes d'érosion et déterminer leur point d'intersection avec l'axe des abscisses correspondant au début de l'érosion. Avec les valeurs de chaque essai, nous traçons les graphiques avec une échelle logarithmique. Dans ce qui suit, nous nous utilisons les valeurs de vitesse d'écoulement pour trouver la *vitesse d'écoulement critique*. La pente des droites obtenues renseigne sur l'érodabilité initiale des sols testés.





|                           | Vitesse critique (m/s) | Érodabilité initiale (mm/h) |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Non traité                | 0,1                    | 3,1                         |
| Traité - 1 jour de cure   | 0,86                   | 0,47                        |
| Traité - 7 jours de cure  | 1,22                   | 3,8                         |
| Traité - 28 jours de cure | 1,54                   | 6                           |
| Traité - 90 jours de cure | 74                     | 0,014                       |

On constate dans ce tableau que les vitesses critiques d'écoulement ont augmenté avec le traitement, mais nous voyons qu'il y a une valeur très élevée. En effet, cette vitesse est de 74 m/s pour le sol traité à 90 jours. C'est clair qu'il y a une erreur. Nous avons pensé que ça est produit par les suivantes choses :

- On a testé deux échantillons de sol après une cure de 90 jours. Pour un des eux, on a observé un comportement très bizarre puisqu'on a atteint une vitesse très élevée (5,65m/s) comparativement à l'autre. Avec cette vitesse l'érosion doit se produire très rapidement mais dans notre cas on a attendu une heure.

- Pour l'autre échantillon, la dernière et plus grande vitesse a été 2,35 m/s. Comme déjà évoqué, la cause de cette anomalie peut être liée à un mauvais compactage du sol.

- Avec la graphique de 90 jours et la ligne de tendance horizontale nous pouvons dire que c'est cohérent en rapport à l'observation que nous avons fait in situ.

Pour l'érodabilité initiale aussi nous avons une disparité dans les résultats. Initialement, la valeur est élevée parce que le sol n'est pas traité. Pour le sol traité, avec un jour de cure, l'érodabilité initiale baisse mais avec 7 et 28 jours, elle augmente. Dans le deux cas, il y a deux valeurs qu'on peut supprimer car elles sont très éloignées des autres. Si on élimine les deux valeurs de 7 jours, on obtient une vitesse critique de 0,95 m/s et une érodabilité de 0,74 mm/h. Pour le sol traité à 28 jours, la vitesse critique est de 1,40 m/s et l'érodabilité initiale est de 1,54 mm/h. Ces valeurs sont plus cohérentes. La confirmation de ces résultats nécessite la réalisation de nouveaux essais.

## ***5. Conclusions et perspectives***

Après la réalisation des essais triaxiaux on a pu constater une amélioration des propriétés mécaniques du sol. Mais de nouveaux essais sont nécessaires car les résultats obtenus ne sont pas très fiables. Avec l'essai d'érodabilité réalisé à EFA, on a pu constater l'augmentation de la résistance du sol à l'érosion. Le temps de traitement influence le comportement à l'érosion du sol étudié.

Une remarque importante concerne la précision des résultats de l'EFA. En effet, nous avons tracé des courbes d'érosion (taux d'érosion en fonction de la vitesse d'écoulement et en fonction de la contrainte de cisaillement) en plaçant des points à partir de 0,01 mm/h. Nous pensons qu'il aurait fallu représenter ces points à partir de 0,1 mm/h car il est très difficile d'avoir une plus grande précision. Les résultats ne seraient cependant pas affectés par cette modification.

Les perspectives et projections de la recherche:

- Continuer avec les essais triaxiaux de tous les échantillons afin d'obtenir des résultats plus fiables et précis du traitement à la chaux;
- Refaire et vérifier les essais triaxiaux déjà réalisés;
- Réalisation de traitements de sols avec autres liants hydrauliques et comparer l'efficacité de chaque traitement;
- Réalisations des essais EFA avec plusieurs échantillons pour chaque traitement pour garantir la précision de l'essai;
- Étudier le comportement d'autres types de sol.

## 6. Bibliographie

BENDAHDANE Fateh. *Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne*.

THÈSE DE DOCTORAT. 2005

PHAM Tuan Long. *Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide*. THÈSE DE DOCTORAT. 2009

HAGHIGHI Iman. *Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques*. THÈSE DE DOCTORAT. 2012

MEHENNI Abdelwadoud, CUISINIER Olivier, MASROURI Farimah. *Impact du Traitement de sol sur l'érosion interne des sols fins compactés*. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. 2014

CRIM Samuel, PARKER Frazier, G. MELVILLE Joel, E. CURRY John, GÜVEN Oktay. *Erosion Characteristics of Alabama Soils Obtained with the Erosion Function Apparatus and Correlations with Classification Properties*. Research Project. 2003

Engineering ToolBox. Colebrook Equation(en ligne). Disponible sur: [http://www.engineeringtoolbox.com/colebrook-equation-d\\_1031.html](http://www.engineeringtoolbox.com/colebrook-equation-d_1031.html) (consulté 05.02.2015)

Daniel Huilier. Viscosité dynamique et cinématique (en ligne). Disponible sur: [http://www.daniel-huilier.fr/Enseignement/Notes\\_Cours/Viscosite/Introduction\\_Viscosite.pdf](http://www.daniel-huilier.fr/Enseignement/Notes_Cours/Viscosite/Introduction_Viscosite.pdf) (consulté 05.02.2015)

## Annexe : Type de classification du sol

### Classification ASTM (American Society for Testing and Materials)

| Major Divisions                                                                        | Group Symbols                                                                  | Typical Names                                                                                                             | Laboratory Classification Criteria                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coarse-grained soils<br>(More than half of material is larger than No. 200 sieve size) | Gravels<br>(More than half of coarse fraction is larger than No. 4 sieve size) | GW<br>Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines                                                       | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 4; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ between 1 and 3<br>Not meeting all gradation requirements for GW                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                        |                                                                                | GP<br>Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                        | Gravels with fines<br>(Appreciable amount of fines)                            | GM <sup>a</sup> d<br>Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures                                                             | Atterberg limits below "A" line or P.I. less than 4<br>Above "A" line with P.I. between 4 and 7 are <i>borderline</i> cases requiring use of dual symbols                                                                                                                                                                                                            |
|                                                                                        |                                                                                | GC<br>Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                        | Sands<br>(More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size)  | SW<br>Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines                                                               | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 6; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ between 1 and 3<br>Not meeting all gradation requirements for SW                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                        |                                                                                | SP<br>Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                        | Sands with fines<br>(Appreciable amount of fines)                              | SM <sup>a</sup> d<br>Silty sands, sand-silt mixtures                                                                      | Atterberg limits above "A" line or P.I. less than 4<br>Limits plotting in hatched zone with P.I. between 4 and 7 are <i>borderline</i> cases requiring use of dual symbols                                                                                                                                                                                           |
|                                                                                        |                                                                                | SC<br>Clayey sands, sand-clay mixtures                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                        | Fine-grained soils<br>(More than half material is smaller than No. 200 sieve)  | ML<br>Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands, or clayey silts with slight plasticity | Determine percentages of sand and gravel from grain-size curve. Depending on percentage of fines (fraction smaller than No. 200 sieve size), coarse-grained soils are classified as follows:<br>Less than 5 per cent<br>More than 12 per cent<br>5 to 12 per cent<br>GW, GP, SW, SP<br>GM, GC, SM, SC<br><i>Borderline</i> cases requiring dual symbols <sup>b</sup> |
|                                                                                        |                                                                                | CL<br>Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                        |                                                                                | OL<br>Organic silts and organic silty clays of low plasticity                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                        |                                                                                | MH<br>Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Fine-grained soils<br>(More than half material is smaller than No. 200 sieve)          | Silty and clays<br>(Liquid limit less than 50)                                 | CH<br>Inorganic clays of high plasticity, fat clays                                                                       | Plasticity Chart<br>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                                                                        |                                                                                | OH<br>Organic clays of medium to high plasticity, organic silts                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                        |                                                                                | Pt<br>Peat and other highly organic soils                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                        | Highly organic soils                                                           |                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

<sup>a</sup>Division of GM and SM groups into subdivisions of d and u are for roads and airfields only. Subdivision is based on Atterberg limits; suffix d used when L.L. is 28 or less and the P.I. is 6 or less; the suffix u used when L.L. is greater than 28.  
<sup>b</sup>Borderline classifications, used for soils possessing characteristics of two groups, are designated by combinations of group symbols. For example: GW-GC, well-graded gravel-sand mixture with clay binder.

## Classification AASHTO

C'est aussi une classification américaine mais c'est exclusivement pour le sol qui s'utilise aux routes.

| General Classification                           | Granular Materials                                         |        |                    |        |                                 |        |        |        | Silt-Clay Materials                                          |        |              |        |        |        |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------|--------------------|--------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------------------------------------|--------|--------------|--------|--------|--------|
|                                                  | 35 percent or less of total sample passing No. 200 (75 µm) |        |                    |        |                                 |        |        |        | More than 35 percent of total sample passing No. 200 (75 µm) |        |              |        |        |        |
| Group Classification                             | A-1                                                        |        | A-3 <sup>[1]</sup> |        | A-2                             |        |        | A-4    |                                                              | A-5    | A-6          |        | A-7    |        |
|                                                  | A-1-a                                                      | A-1-b  | A-3                | A-3a   | A-2-4                           | A-2-5  | A-2-6  | A-2-7  | A-4a                                                         |        | A-4b         | A-6a   | A-6b   | A-7-5  |
| Sieve analysis, percent passing:                 |                                                            |        |                    |        |                                 |        |        |        |                                                              |        |              |        |        |        |
| No. 10 (2 mm)                                    | 50 max                                                     |        |                    |        |                                 | *      |        |        |                                                              | **     | *            |        |        | *      |
| No. 40 (425 µm)                                  | 30 max                                                     | 50 max | 51 min             | [1]    |                                 |        |        |        | (1)                                                          | (4)    |              |        |        |        |
| No. 200 (75 µm)                                  | 15 max                                                     | 25 max | 10 max             | 35 max | 35 max                          | 35 max | 35 max | 35 max | 36 min                                                       | 50 min | 36 min       | 36 min |        | 36 min |
| Characteristics of fraction passing No. 40       |                                                            |        |                    |        |                                 |        |        |        |                                                              |        |              |        |        |        |
| Liquid limit                                     | —                                                          | —      | Non-               | —      | 40 max                          | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max                                                       | 41 min | 40 max       | 40 max | 41 min | 41 min |
| Plasticity index                                 | 6 max                                                      | 6 max  | Plastic            | 6 max  | 10 max                          | 10 max | 11 min | 11 min | 10 max                                                       | 10 max | 10 max       | 11-15  | 16 min | <LL-30 |
| Group Index                                      |                                                            |        |                    | 0      |                                 |        |        | 4 max  |                                                              | 8 max  |              | 10 max | 16 max | >LL-30 |
| Usual types of significant constituent materials | Stone fragments, gravel and sand                           |        | Fine sand          | Sand   | Silty or clayey gravel and sand |        |        |        | Silty soils                                                  |        | Clayey soils |        |        |        |
| General rating as subgrade                       | Excellent to good                                          |        |                    |        |                                 |        |        |        | Good to fair                                                 |        |              |        |        |        |

### Notes

- With the test data available, the classification of a soil is found by proceeding from left to right on the chart. The first classification that the test data fits is the correct classification.
- \* A-2-5 is not allowed under 703.16.B. A-5 and A-7-5 is not allowed under 703.16.A. See "Natural Soil and Natural Granular Soils" (203.02.H) in this manual.
- \*\* A-4b is not allowed in the top 3 feet (1.0 m) of the embankment under 203.03.A.
- [1] The placing of A-3 before A-2 is necessary in the "left to right" process, and does not indicate superiority of A-3 over A-2.
- [2] A-3a must contain a minimum 50 percent combined coarse and fine sand sizes (passing No. 10 but retained on No. 200, between 2 mm and 75 µm).
- [3] A-4a must contain less than 50 percent silt size material (between 75 µm and 5 µm).
- [4] A-4b must contain 50 percent or more silt size material (between 75 µm and 5 µm).

## Classification PG-3 Española

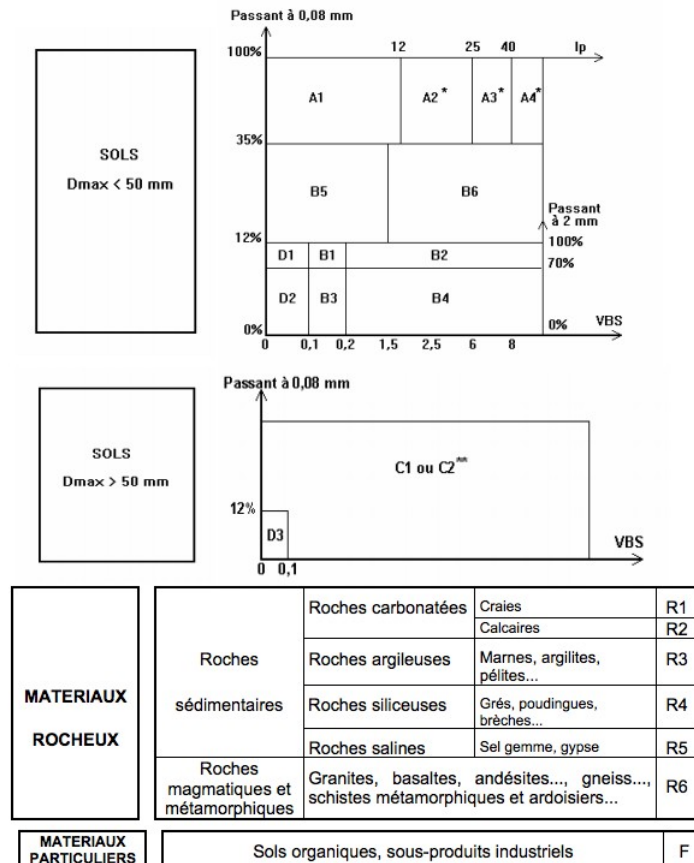
### PG3 Orden FOM 1328/2002

#### Clasificación de los materiales

|                          | Seleccionados | Adecuados            | Tolerables           | Marginales       |
|--------------------------|---------------|----------------------|----------------------|------------------|
| Materia orgánica (%)     | MO < 0.2      | MO < 1               | MO < 2               | MO < 5           |
| Sales solubles (%)       | SS < 0.2      | SS < 0.2             | Y < 5, SS < 1        |                  |
| Tamaño máximo (mm)       | Dmax ≤ 100    | Dmax ≤ 100           |                      |                  |
| Pasa 2 UNE (%)           | # 2 < 80      | # 2 < 80             |                      |                  |
| Pasa 0.40 UNE (%)        | # 0.40 ≤ 15   | ó # 0.40 < 75        |                      |                  |
| Pasa 0.080 UNE (%)       | # 0.080 < 25  | # 0.080 < 35         |                      |                  |
| Límite Líquido           | LL < 30       | LL < 40; si LL > 30, | LL < 65; si LL > 40, | si LL > 90,      |
| Índice de Plasticidad    | IP < 10       | IP > 4               | IP > 0.73(LL-20)     | IP < 0.73(LL-20) |
| Asiento por colapso (%)  |               |                      | Asiento < 1          |                  |
| Hinch. por expansión (%) |               |                      | Hinch < 3            | Hinch < 5        |

## Classification norme NF P 11 300 française

**Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature**



Classe **A**

Tableau 1 - **Classification des sols fins**

| Classement selon la nature                               |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | Classement selon l'état hydrique                                                                                                                                 |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Paramètres de nature<br>Premier niveau de classification | Classe                    | Paramètres de nature<br>Deuxième niveau de classification                        | Sous classe fonction de la nature                                                                                                    | Paramètres d'état                                                                                                                                                | Sous classe fonction de l'état |
| D <sub>max</sub> ≤ 50 mm<br>et<br>Tamisat à 80 µm > 35%  | <b>A</b><br><br>Sols fins | <b>VBS ≤ 2,5<sup>(*)</sup></b><br>ou<br><b>I<sub>p</sub> ≤ 12</b>                | <b>A<sub>1</sub></b><br>Limos peu plastiques, loess,<br>sils alluvionnaires, sables fins<br>peu pollués, arènes peu<br>plastiques... | <b>IPI<sup>(*)</sup> ≤ 3</b> ou <b>w<sub>n</sub> ≥ 1,25 w<sub>OPN</sub></b>                                                                                      | <b>A<sub>1</sub> th</b>        |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>3 &lt; IPI<sup>(*)</sup> ≤ 8</b> ou <b>1,10 ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,25 w<sub>OPN</sub></b>                                                                     | <b>A<sub>1</sub> h</b>         |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>8 &lt; IPI ≤ 25</b> ou <b>0,9 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,1 w<sub>OPN</sub></b>                                                                    | <b>A<sub>1</sub> m</b>         |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>0,7 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 0,9 w<sub>OPN</sub></b>                                                                                              | <b>A<sub>1</sub> s</b>         |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>w<sub>n</sub> &lt; 0,7 w<sub>OPN</sub></b>                                                                                                                    | <b>A<sub>1</sub> ts</b>        |
|                                                          |                           | <b>12 &lt; I<sub>p</sub> ≤ 25<sup>(*)</sup></b><br>ou<br><b>2,5 &lt; VBS ≤ 6</b> | <b>A<sub>2</sub></b><br>Sables fins argileux, limons,<br>argiles et marnes peu plastiques<br>arènes...                               | <b>IPI<sup>(*)</sup> ≤ 2</b> ou <b>I<sub>c</sub><sup>(*)</sup> ≤ 0,9</b> ou <b>w<sub>n</sub> ≥ 1,3 w<sub>OPN</sub></b>                                           | <b>A<sub>2</sub> th</b>        |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>2 &lt; IPI<sup>(*)</sup> ≤ 5</b> ou <b>0,9 ≤ I<sub>c</sub><sup>(*)</sup> &lt; 1,05</b> ou <b>1,1 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,3 w<sub>OPN</sub></b> | <b>A<sub>2</sub> h</b>         |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>5 &lt; IPI ≤ 15</b> ou <b>1,05 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,2</b> ou <b>0,9 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,1 w<sub>OPN</sub></b>                            | <b>A<sub>2</sub> m</b>         |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>1,2 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,4</b> ou <b>0,7 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 0,9 w<sub>OPN</sub></b>                                                       | <b>A<sub>2</sub> s</b>         |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>I<sub>c</sub> &gt; 1,3</b> ou <b>w<sub>n</sub> &lt; 0,7 w<sub>OPN</sub></b>                                                                                   | <b>A<sub>2</sub> ts</b>        |
|                                                          |                           | <b>25 &lt; I<sub>p</sub> ≤ 40<sup>(*)</sup></b><br>ou<br><b>6 &lt; VBS ≤ 8</b>   | <b>A<sub>3</sub></b><br>Argiles et argiles marneuses,<br>limons très plastiques...                                                   | <b>IPI<sup>(*)</sup> ≤ 1</b> ou <b>I<sub>c</sub><sup>(*)</sup> ≤ 0,8</b> ou <b>w<sub>n</sub> ≥ 1,4 w<sub>OPN</sub></b>                                           | <b>A<sub>3</sub> th</b>        |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>1 &lt; IPI<sup>(*)</sup> ≤ 3</b> ou <b>0,8 ≤ I<sub>c</sub><sup>(*)</sup> &lt; 1</b> ou <b>1,2 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,4 w<sub>OPN</sub></b>    | <b>A<sub>3</sub> h</b>         |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>3 &lt; IPI ≤ 10</b> ou <b>1 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,15</b> ou <b>0,9 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,2 w<sub>OPN</sub></b>                              | <b>A<sub>3</sub> m</b>         |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>1,15 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,3</b> ou <b>0,7 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 0,9 w<sub>OPN</sub></b>                                                      | <b>A<sub>3</sub> s</b>         |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      | <b>I<sub>c</sub> &gt; 1,3</b> ou <b>w<sub>n</sub> &lt; 0,7 w<sub>OPN</sub></b>                                                                                   | <b>A<sub>3</sub> ts</b>        |
|                                                          |                           | <b>I<sub>p</sub> &gt; 40<sup>(*)</sup></b><br>ou<br><b>VBS &gt; 8</b>            | <b>A<sub>4</sub></b><br>Argiles et argiles marneuses,<br>très plastiques...                                                          | Valeurs seuils des paramètres d'état,<br>à définir à l'appui d'une étude spécifique                                                                              |                                |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                  |                                |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                  |                                |
|                                                          |                           |                                                                                  |                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                  |                                |

## Table des illustrations

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: Les différentes formes d'érosion interne .....                                                                                                                                                      | 02 |
| Figure 2 : Phénomène d'entraînement .....                                                                                                                                                                     | 03 |
| Figure 3 : Phénomène d'érosion régressive .....                                                                                                                                                               | 03 |
| Figure 4 : Phénomène de débouillage .....                                                                                                                                                                     | 03 |
| Figure 5 : Schéma représentatif des divers phénomènes initiateurs de l'érosion dans un barrage (cité par Blais, 2004) .....                                                                                   | 04 |
| Figure 6 : Les différents mécanismes d'initiations de l'érosion interne .....                                                                                                                                 | 07 |
| Figure 7 : illustration de la contrainte de cisaillement .....                                                                                                                                                | 07 |
| Figure 8: Schéma Hydraulic Flume test .....                                                                                                                                                                   | 07 |
| Figure 9 : Schéma rotating cylinder test.....                                                                                                                                                                 | 07 |
| Figure 10 : Schéma Hole Érosion test.....                                                                                                                                                                     | 08 |
| Figure 11 : Appareil EFA.....                                                                                                                                                                                 | 08 |
| Figure 12 : Classification de l'érodabilité par Briaud .....                                                                                                                                                  | 09 |
| Figure 13 : Schéma MoJET.....                                                                                                                                                                                 | 14 |
| Figure 15 : Schématisation d'essai d'émiettement amélioré.....                                                                                                                                                | 14 |
| Figure 14 : Trousse coupante .....                                                                                                                                                                            | 15 |
| Figure 16 : réalisation d'un échantillon triaxial.....                                                                                                                                                        | 21 |
| Figure 17 : Schéma essai triaxial.....                                                                                                                                                                        | 22 |
| Figure 18 : en ordre (a) phase de consolidation, (b) phase de coupe (contrainte verticale accrue en maintenant constante la pression dans la cellule) et c) cercle de Mohr au cours de la phase de coupe..... | 25 |
| Figure 19 : Essai numéro 1 NT.....                                                                                                                                                                            | 26 |
| Figure 20 : Essai numéro 2 NT.....                                                                                                                                                                            | 26 |
| Figure 21 : Essai numéro 3 NT.....                                                                                                                                                                            | 26 |
| Figure 22 : Cercles de Mohr selon la Norme Française NT.....                                                                                                                                                  | 27 |
| Figure 23 : Cercles de Mohr à partir des pressions interstitielles NT.....                                                                                                                                    | 27 |
| Figure 24 : Essai numéro 1 T1J.....                                                                                                                                                                           | 28 |
| Figure 25 : Essai numéro 2 T1J.....                                                                                                                                                                           | 28 |
| Figure 26: Cercles de Mohr selon NF T1J.....                                                                                                                                                                  | 29 |
| Figure 27: Cercles de Mohr à partir des pressions interstitielles .....                                                                                                                                       | 29 |
| Figure 28 : Essai numéro 1 T7J.....                                                                                                                                                                           | 30 |
| Figure 29 : Essai numéro 2 T7J.....                                                                                                                                                                           | 30 |
| Figure 30 : Essai numéro 3 T7J.....                                                                                                                                                                           | 30 |
| Figure 31 : Cercles de Mohr selon NF T7J.....                                                                                                                                                                 | 31 |
| Figure 32 : Cercles de Mohr à partir des pressions interstitielles T7J.....                                                                                                                                   | 31 |
| Figure 33: Exemple d'un échantillon déjà coupé.....                                                                                                                                                           | 32 |
| Figure 34 : Tube Shelby.....                                                                                                                                                                                  | 32 |
| Figure 35 : Abaque de Moody .....                                                                                                                                                                             | 34 |
| Figure 36 : Appareil EFA.....                                                                                                                                                                                 | 35 |
| Figure 37 : l'évolution de l'érosion pendant la réalisation d'un essai EFA .....                                                                                                                              | 36 |