

FERROIR Tristan
KHELIFI Elyas
LETELLIER Matthieu

Etude de la thixotropie des sols à partir d'un exemple en région parisienne

Année 2000-2001

Etude de la thixotropie des sols à partir d'un exemple en région parisienne.

Sommaire

INTRODUCTION	p.1
<u>I) Etude de terrain et des caractéristiques physico-chimiques du sol étudié</u>	p.1
A) Choix du sol étudié	p.1
B) Etude de terrain	
1) Découverte du terrain	
2) Caractéristiques du lieu de prélèvement	
3) Description des horizons	
C) Caractéristiques du sol	p.2
1) Granulométrie	
2) Teneur en eau sur le terrain	
3) Etude de la porosité	
<u>II) Etude expérimentale du comportement mécanique du sol prélevé</u>	p.3
A) Dispositif expérimental et protocole mesurant la variation de portance du sol	p.3
1) Présentation du protocole	
2) Intérêts du montage et problèmes rencontrés	
a- Intérêts du montage	
b- Problèmes rencontrés	
B) Etude de l'influence de deux paramètres physico-chimiques sur le comportement mécanique du sol	p.4
1) Influence de la teneur en eau	
a- Etude avec une teneur en eau témoin	
b- Influence de la variation de teneur en eau	
2) Influence de l'ajout d'électrolytes	
a- Ajout de CaSO ₄	
b- Ajout de NaOH	
C) Etude des temps caractéristiques	p.6
1) Description du protocole	
2) Résultats	
3) Interprétation	
<u>III) Proposition d'interprétation physique et particulière du phénomène</u>	p.7
A) Modélisation particulière de la thixotropie	p.7
1) Interprétation de la variation de portance du sol lors de l'exposition aux ondes	
2) Interprétation de l'influence de différents facteurs	
a- Distance par rapport au centre	
b- Fréquence	
c- Electrolytes	
B) Modélisation macroscopique de la thixotropie	p.8
C) Application à des sols connus pour leur propriété thixotropique : les andosols	p.8
1) Présentation	
2) Etude expérimentale	
3) Bilan	
CONCLUSION	p.10
BIBLIOGRAPHIE	p.10
REMERCIEMENTS	p.10

Au cours des séismes de Kobé (1995) et de Mexico (1969), en particulier, on a pu observer que certains sols et certains sous-sols changeaient de propriétés physiques sous l'action des ondes sismiques. Ces phénomènes sont spectaculaires, puisqu'ils peuvent conduire à l'engloutissement total d'un immeuble de plusieurs étages.

« La thixotropie est la propriété que possèdent certains systèmes rigides de devenir liquides par agitation et de redevenir solides par simple repos » [1]. Elle peut se manifester chez certains sols dans des conditions particulières : c'est ce que nous choisissons d'étudier à partir d'un exemple.

Quelles sont les modalités de ce phénomène et comment se manifeste-t-il pour un sol, quel est le rôle des différents constituants du sol, notamment du complexe argilo-humique dans ce phénomène?

Notre premier problème a été de trouver un sol susceptible de présenter la propriété de thixotropie. Une fois trouvé, nous avons déterminé certaines de ses caractéristiques physiques et granulométriques et nous avons cherché à caractériser son comportement thixotropique.

Nous avons ensuite étudié quelques facteurs qui influencent la thixotropie du sol et mesuré leur importance.

Enfin, nous avons proposé une interprétation du phénomène d'un point de vue mécanique ainsi qu'une hypothèse de comportement à l'échelle particulaire : quel est le comportement des particules, quel est le rôle de l'eau, des électrolytes dans le changement de comportement mécanique et comment cela s'applique-t-il à un sol connu pour ses propriétés thixotropiques (étude d'un andosol) ?

I-Etude de terrain et des caractéristiques physico-chimiques du sol étudié

A) Choix du sol étudié

Sur les conseils de M. Michel Isambert, pédologue à l'unité de science du sol de l'INRA d'Orléans, nous avons trouvé un sol, à l'aide de la carte pédologique de Chartres au 1/100000 [2], dans la forêt de Rambouillet, à la base des sables de Fontainebleau : il s'agit du sol 51: il se trouve dans la division XXVI, au SSE de l'étang de Gruyer à l'intersection de deux rus intermittents [3]. Nous l'avons prélevé sur le versant d'un vallon au fond duquel coule un ru.

B) Etude de terrain

1) Découverte du terrain

Nous sommes allés en forêt de Rambouillet. Nous avons recherché le sol 51 à l'aide de la carte topographique au 1/25000 (fig 2) et de la carte pédologique (fig 1). La parcelle que nous avons repérée était plantée de *Pseudotsuga menziesii*. De plus, la végétation est celle des bois et sous-bois (fougères aigle, espèce polytrich,...).

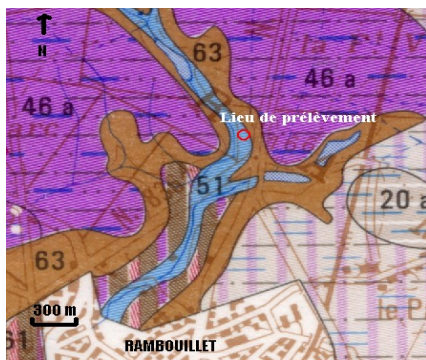


fig 1 : carte pédologique de Chartres

fig 2 : carte topographique de Rambouillet

2) Caractéristiques du terrain de prélèvement

Dans la parcelle repérée et plus précisément au niveau du versant Est (Fig 3), nous avons d'abord vérifié que nous avions bien affaire à un sol et non à des alluvions (on y a effectivement trouvé des racines, de nombreux fragments végétaux et plusieurs lombrics). En tapotant du pied, nous avons constaté que le sol était bien thixotropique dans les conditions de terrain. Nous avons étudié l'agencement des différents horizons du sol en réalisant des carottes. Nous avons également relevé le "pendage" du sol de part et d'autre du lit : la pente située à l'Ouest est régulière avec une inclinaison moyenne de 20° alors que la partie Est présente une pente convexe avec une inclinaison de 31,8°.

3) Description des horizons du sol prélevé.

On constate un horizon humifère, A00, réduit (3cm). Il contient différents fragments végétaux, surtout des aiguilles de *Pseudotsuga menziesii* (Douglas). La granulométrie est très fine. Cet horizon est de couleur marron foncé.

L'horizon situé en dessous que nous appelons A0, a une épaisseur de 15 cm. Il possède une granulométrie très fine mais les particules ont une tendance à s'agglomérer. On y trouve encore quelques fragments organiques, et les racines des végétaux s'y développent encore mais la couleur est plus claire que celle de A00.

On constate ensuite l'apparition contrastée d'un horizon que nous nommons A1. Il est de couleur encore plus claire. Il présente lui aussi une granulométrie très fine. Nous savons que cet horizon a une épaisseur supérieure ou égale à 40 cm car notre prélèvement a 60cm de profondeur et nous n'atteignons pas la limite inférieure de cet horizon.



fig 4 : Carotte du sol

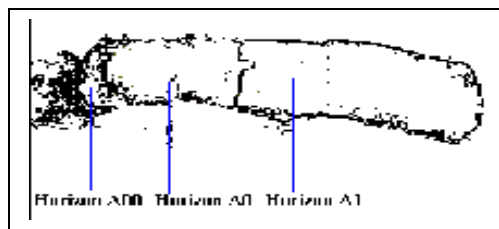


fig 5 : Dessin d'interprétation

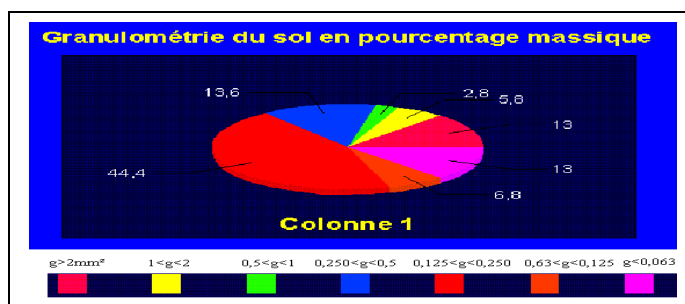
En résumé, le sol prélevé possède trois horizons bien discernables, d'épaisseurs relatives assez inégales.

Notons que le matériau dont nous avons ensuite étudié le comportement mécanique est un mélange de ces trois horizons, la majeure partie de la fraction humique ayant été enlevée après tamisage (mailles de 1mm²).

C)Caractéristiques du sol.

1)Granulométrie

- taille > 2mm² : 13%
- 1 < taille < 2 : 5.8%
- 0,5 < taille < 1 : 2.8%
- 0,250 < taille < 0,5 : 13.6%
- 0,125 < taille < 0,250 : 44.4%
- 0,063 < taille < 0,125 : 6.8%
- taille < 0,063 : 13%



Pour cela, nous avons réalisé un tamisage d'un échantillon de 500g à différents diamètre de tamis afin de mesurer la fraction massique de chacune des granulométries différentes.

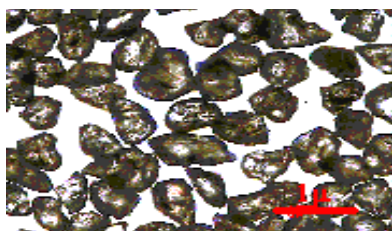


fig 6 : Observation microscopique du sol

La fraction massique formée de grains de taille supérieure à 1mm² est essentiellement constituée de petits cailloux, de racines et d'autres fragments végétaux. Ces particules n'ont pas d'influence dans la thixotropie (com.pers.) et pour faciliter la partie expérimentale, nous n'avons utilisé que la partie du sol dont la granulométrie est inférieure à 1mm². Par ailleurs, les observations microscopiques des différentes fractions montre que plus de 90% du sol est composé de grains de quartz, la partie restante pouvant être définie comme "fraction colloïdale".

L'eau dans laquelle nous avons fait décanter le sol présente une couleur brune marquée ce qui indique donc la présence de particules très fines constituant la fraction colloïdale (taille des particules entre 0.01 µm et 1µm).

2)Teneur en eau sur le terrain

Nous avons prélevé sur le terrain 1494g de sol . Nous avons placé l'échantillon dans un sac hermétique de façon à ne pas perdre d'eau par évaporation et nous l'avons rapidement pesé puis placé dans l'étuve à 105°C pendant huit heures. La masse du sol après évaporation (supposée totale) est de 1241g avec les incertitudes liées au changement de récipients. La teneur en eau est donc égale à : (1494-1241)/1241=20.4% .

3)Etude de la porosité [4]

*description du protocole : dans un récipient nous plaçons 100g de sol tamisé, puis versons de l'eau sur le sol, elle ne pénètre plus pour 48 ml versés, cela donne la porosité totale. Puis nous plaçons le sol saturé en eau dans une éprouvette graduée, sur un papier filtre et on recueille l'eau tombant par gravité (eau de gravité), le volume est de 14 ml, cela donne la macroporosité. La microporosité est la différence entre la porosité totale et la macroporosité.

*résultats des tests de porosité sur notre sol: porosité totale : 48%, macroporosité: 14%, microporosité : 34%.

*interprétation : la porosité totale donne le volume des espaces occupés par l'air, la macroporosité donne le volume d'eau retenue par gravité et la microporosité donne le volume d'eau retenue par d'autres interactions.

II-Etude expérimentale du comportement mécanique du sol prélevé

Dans cette partie, nous étudions les différents paramètres influant sur le comportement mécanique du sol : la teneur en eau pondérale, les fréquences et l'amplitude des vibrations auxquelles est soumis le sol, l'ajout d'électrolytes et le temps de repos c'est à dire la durée entre deux contraintes successives. Comment ces différents paramètres interviennent dans le changement de comportement mécanique du sol ? Pour effectuer cette étude sur le sol prélevé, nous avons eu recours à deux dispositifs expérimentaux complémentaires.

A) Dispositif expérimental et protocole mesurant la variation de portance du sol

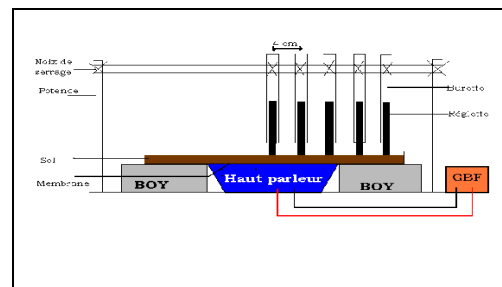
1)Présentation du protocole

Nous avons conçu un protocole nous permettant de communiquer des ondes de compression à une quantité définie de sol et de mesurer la variation de comportement mécanique conséquente. Nous avons utilisé une couronne en bois de 40 cm de diamètre, 6cm de hauteur sur laquelle nous avons installé un fond élastique constitué de quatre couches de plastique et d'une couche de scotch. Les ondes de compression ont été communiquées grâce à un haut parleur dont la fréquence et l'amplitude de la vibration sont contrôlées à l'aide d'un générateur basse fréquence. Le haut parleur est placé en dessous du récipient (maintenu par des supports Boy), le centre du haut parleur coïncidant avec le centre du récipient. Les mesures des temps d'exposition aux ondes et temps de repos sont faites à l'aide d'un chronomètre (l'incertitude de temps est de quelques ms, due à l'arrêt du chronomètre et du GBF).

La mesure de la thixotropie du sol provoquée par l'exposition aux ondes est mesurée par l'enfoncement de réglettes de 17 cm, 5g à section carrée dans le sol lors de l'exposition aux ondes. Ces réglettes sont posées sur le sol à l'aide d'un dispositif particulier qui permet de plus la mesure de l'enfoncement; il s'agit de 5 burettes alignées et maintenues par une potence. Chaque petite graduation de burette correspond à 1mm. Par cette mesure d'enfoncement nous pouvons quantifier le changement de portance du sol qui définit la thixotropie c'est à dire, la force qu'exerce le sol en opposition à l'enfoncement des réglettes.



a) Photo du montage



b) Principe du montage

fig 7 : premier protocole

Pour les mesures, on pose les règles sur le sol et on note la graduation de départ sur la burette. On soumet ensuite le sol aux vibrations pendant une durée de 20 secondes. On relève ensuite à nouveau la graduation finale. On effectue la différence des deux afin de déterminer l'enfoncement (l'incertitude est donc d'un millimètre). Pour la mesure suivante, on tourne le bac de façon à ne pas réutiliser les mêmes emplacements. Les mesures sont effectuées après avoir laissé le sol se reposer (temps de repos) pendant 30 secondes. On réalise une mesure tous les 5Hz entre 0 et 100Hz. La durée totale d'une série de mesures est de vingt minutes, ce qui nous permet de négliger l'évaporation.

2)Intérêts du montage et problèmes rencontrés

a) Intérêts du montage:

- *La membrane en plastique constituant le fond de notre récipient est très élastique, ceci nous permet de communiquer les ondes au sol (via le haut parleur) sans interactions physiques directes avec le sol et quasiment sans amortissements.
- *L'utilisation d'un récipient de grande surface nous permet de mesurer l'influence de l'éloignement au centre (lieu d'émission des ondes) sur la thixotropie du sol.
- *Le générateur basse fréquence permet de contrôler la fréquence des ondes émises par le haut parleur, facteur dont nous voulons connaître l'influence sur la thixotropie.

b) Problèmes rencontrés pour la réalisation des expériences:

- *Le mode de propagation des ondes et leur évolution nous sont inconnus. Seules la fréquence et l'amplitude du signal électrique transmises au haut-parleur (ondes telles qu'elles sont émises par le haut-parleur) nous sont connues. De plus, l'utilisation de 4 supports "BOY", nécessaires pour soutenir la membrane (c'est-à-dire empêcher une incurvation de celle-ci sous le poids du sol), complique la compréhension de propagation des ondes dans le récipient. Nous pouvons surtout supposer qu'il y a un amortissement de l'amplitude des ondes du centre vers la périphérie.
- *Lors de la rotation du bac, la règle du centre reste à l'endroit où elle était posée à la mesure précédente alors que ce

n'est pas le cas pour les autres règles.

*La durée d'exposition aux ondes peut se révéler trop longue pour caractériser de façon plus fine le phénomène surtout lors d'un enfoncement total des règles.

B) Etude de l'influence de deux paramètres physico-chimiques sur le comportement mécanique du sol

1) Influence de la teneur en eau

Ce paramètre nous a paru dans une première approche déterminant dans le déroulement du phénomène. En effet, on s'enfonce plus facilement dans un sol gorgé d'eau. La thixotropie est une chute brutale de viscosité qui peut être considérée en première approximation comme un passage d'un comportement solide à un comportement liquide. Nous avons donc envisagé d'étudier l'influence de teneurs en eau pondérales différentes sur le déroulement du phénomène. La teneur en eau pondérale est calculée comme suit :

Teneur pondérale = (masse de sol mouillé - masse de sol sec) / masse de sol sec

Pour connaître précisément la teneur en eau pondérale, nous avons tout d'abord séché le sol en le passant à l'étuve à 45°C pendant trois jours. On "casse" ensuite le sol, on le remet sous forme poudreuse afin qu'il soit homogène. On ajoute ensuite progressivement l'eau distillée (afin que la quantité en ions minéraux contenus dans le sol reste constante) en homogénéisant pour que la teneur en eau soit la même en tout point du sol.

a- Etude avec une teneur en eau témoin

L'expérience a été menée pour une teneur pondérale en eau de 20% constatée le jour du prélèvement sur le terrain.

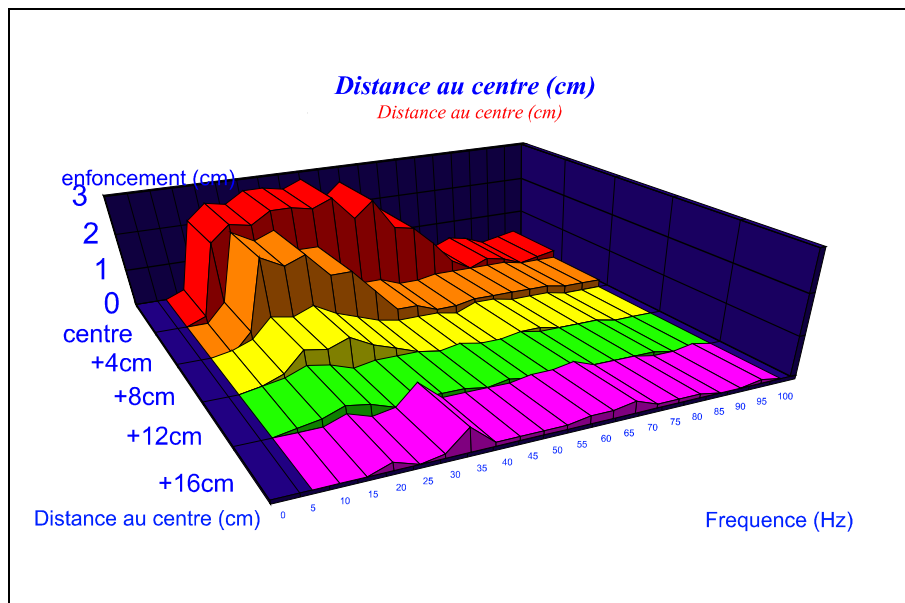


fig 8 : Importance de l'enfoncement en fonction de la distance au centre et de la fréquence des ondes

* analyse de la fig 8 : Nous postulons que l'enfoncement des règles est fonction des propriétés mécaniques du sol. En règle générale, l'enfoncement diminue quand la distance au centre augmente : par exemple pour une fréquence de 25 Hz, on passe d'un enfoncement nul à 16 cm du centre à un enfoncement de 2.5 cm au centre. De plus, le spectre des fréquences pour lesquelles l'enfoncement est conséquent (supérieur à 1mm) est d'autant plus large que l'on s'approche du centre.

Il existe des fréquences permettant un enfoncement optimal de toutes les règles c'est à dire un phénomène thixotropique optimal. Il s'agit d'une gamme de fréquences comprises entre 10 Hz et 50 Hz quelle que soit la distance au centre.

En plus de cette gamme, il existe des fréquences (de 40 Hz à 100 Hz) permettant une bonne manifestation thixotropique du sol seulement pour les deux règles les plus centrales. On passe d'une gamme de 10 Hz - 50 Hz à 16 cm du centre à une gamme de 10 Hz - 80 Hz au centre.

*interprétations : L'enfoncement diminue quand la distance au centre augmente car les deux règles du centre se trouvent juste au dessus du haut-parleur, tandis que les trois autres règles se trouvent au niveau des supports boy, on peut donc envisager l'existence d'amortissements (diminution de l'amplitude des ondes) au cours de leur propagation dans le dispositif. L'amortissement des vibrations est sans doute moindre au centre.

b- Influence de la variation de la teneur en eau

Nous avons effectué une seconde série de mesures selon le même protocole que précédemment mais avec une teneur en eau différente : 18% de teneur en eau pondérale pour la première (fig 10-1) et 22% pour la seconde (fig 10-2).

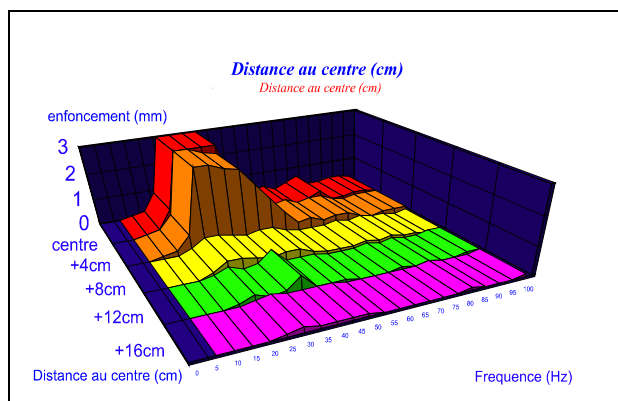


fig 10-1 : teneur en eau **18%**

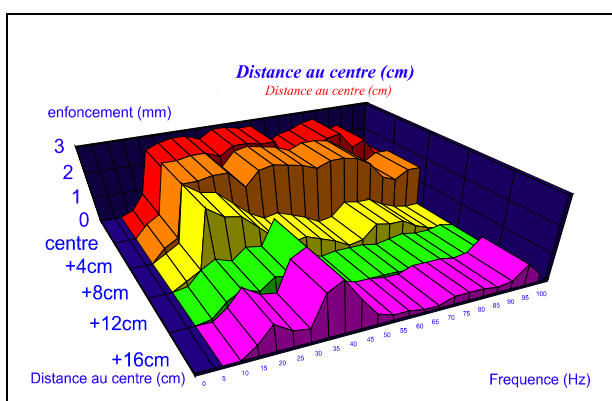


fig 10-2 : teneur en eau **22%**

fig 10 : Importance de l'enfoncement en fonction de la distance au centre et de la fréquence des ondes

*analyse : On constate un élargissement de la gamme de fréquences qui permet un enfoncement conséquent des règles : pour 18% la gamme est de 15 – 45 Hz, pour 20% elle est de 10-50 Hz et pour 22% elle de 0-100 Hz.

En règle générale l'enfoncement pour chacune des règles augmente avec la teneur en eau, par exemple pour la règle située à 8 cm du centre, pour une fréquence de 20 Hz, l'enfoncement est de 0.5 cm à 18%, de 2 cm à 20%, de 3 cm à 22%.

2) Influence de l'ajout d'électrolytes

Dans la littérature [5] , il est dit que certains électrolytes notamment le calcium, les ions H⁺ ont une influence sur le comportement mécanique de certains sols. En effet, le sol contient des particules chargées susceptibles d'interagir avec les électrolytes notamment le complexe argilo-humique (CAH) et influencer ainsi sur son comportement mécanique. Dans quelle mesure l'ajout de différents ions à concentration déterminée influe sur le comportement thixotropique du sol étudié ?

a- Ajout de CaSO₄

Nous avons choisi de tester l'influence d'une solution de sulfate de calcium à 175 mg de calcium par litre de solution (afin d'avoir une concentration conséquente en ions) sur le sol étudié. Nous avons réalisé l'expérience en gardant une teneur en eau du sol de 20% (référence). On obtient la courbe suivante:

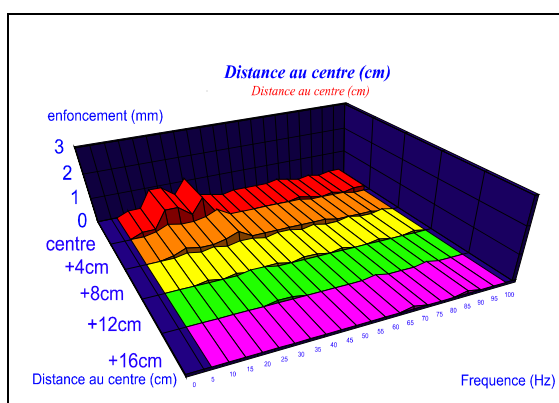


Fig 11 : Influence de l'ajout de CaSO₄ sur la thixotropie

Ces résultats montrent que pour une même teneur en eau (20%), l'ajout de CaSO₄ diminue l'importance de l'enfoncement pour toutes les réglettes. L'enfoncement est à peine perceptible pour les trois réglettes les plus externes et l'enfoncement pour les deux réglettes les plus centrales est nettement moins important que sans ajout de CaSO₄ (pour la règle centrale, à 30 Hz, l'enfoncement est de 2.5 cm sans CaSO₄ et de 1 cm avec CaSO₄). De plus, la gamme de fréquences pour laquelle le sol manifeste un changement de comportement est beaucoup plus réduite (de 15 à 50Hz). Nous ne pouvons bien entendu pas conclure si ce résultat provient de l'influence de Ca²⁺ ou de SO₄²⁻. Rappelons cependant que le Ca²⁺ est connu pour ces propriétés d'agrégation des particules de C.A.H du sol qui sont globalement chargées négativement.

b- Ajout de NaOH

L'expérience a été réalisée pour une teneur en eau de 20% avec un ajout de NaOH tel que le pH ne soit plus de 4,6 comme précédemment mais de 7,6. La deuxième courbe présentée est celle d'un pH de 8,6. Résultats :

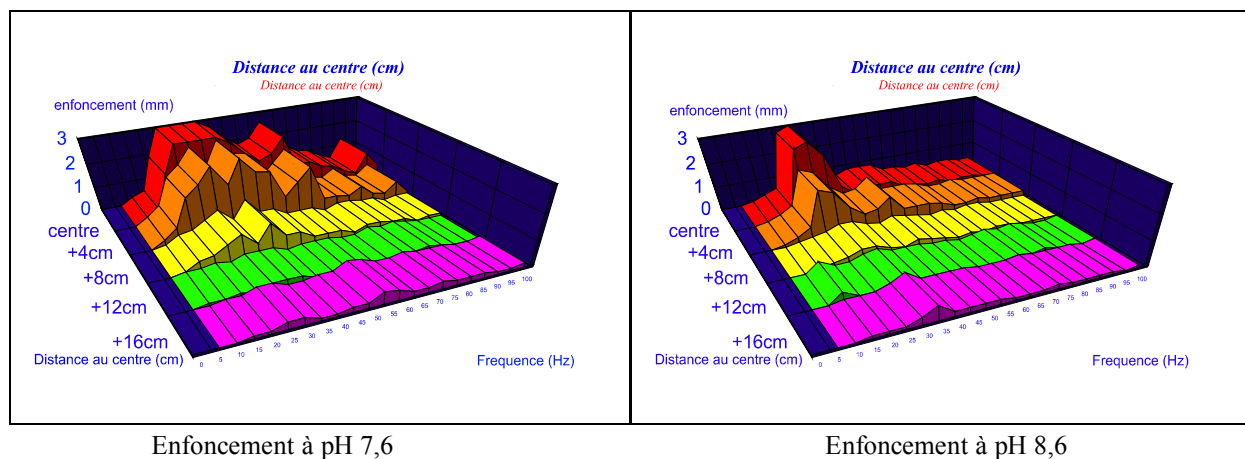


fig 12 : Importance de l'enfoncement en fonction de la distance au centre et de la fréquence des ondes.

On constate que pour un pH de 7,6 la thixotropie augmente par rapport à la même teneur en eau sans ajout d'ion alors que lorsqu'on continue à augmenter le pH du sol, la thixotropie diminue alors de façon importante.

C) Etude des temps caractéristiques

Le temps de prise caractérise le comportement mécanique du sol, c'est le temps au bout duquel le sol retrouve un état stable après avoir manifesté un comportement thixotropique; on appelle temps de prise, le temps nécessaire pour que le sol retrouve son état et ses propriétés physiques initiales.

Le temps de repos décrit la durée entre deux contraintes successives.

Pour étudier le temps de prise de notre sol, nous avons eu recours à un deuxième dispositif (fig 14 et fig 15) car le premier protocole ne permettait pas de le faire. Nous mesurons ce paramètre par l'étude des capacités d'écoulement du sol sur un plan incliné.

1) Description du protocole

On prépare un échantillon de 1kg de notre sol à 20% d'eau pour réaliser une série de mesures. On met en place un plan dont l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale est variable. On soumet l'échantillon pendant 10 s à des vibrations de fréquence 40Hz avant chaque mesure pour que celui-ci garde des caractéristiques mécaniques semblables puis il est déposé au sommet du plan. L'opération se déroule en trois temps :

-Ecoulement de l'échantillon.

-Le sol s'immobilise : on laisse alors reposer l'échantillon pendant θ_r secondes variable.

-Puis on augmente la valeur de l'angle d'inclinaison du plan : $\alpha + \Delta\alpha$ jusqu'à ce qu'un nouvel écoulement ait lieu. On mesure la variation de l'inclinaison nécessaire pour remettre en mouvement le sol en fonction du temps de repos. On retient la valeur de $\Delta\alpha$ et celle de dt .

Nous ne considérons que les phénomènes d'écoulement du sol et non les phénomènes de glissements.

2) Résultats

Lorsque nous avons soumis le sol à des vibrations puis déposé sur le plan incliné, il s'est écoulé de façon fluide pendant un temps très court (inférieur à la seconde). Nous l'avons d'abord laissé au repos pendant $\theta_r = 20$ s puis nous avons incliné à nouveau le plan. Quelle que soit la variation d'inclinaison $\Delta\alpha$, il n'y a pas de remise en mouvement du sol.

Des mesures complémentaires avec des temps de repos plus courts ($\theta_r = 15s, 10s, 5s, 3s, 1s$) donnent les mêmes résultats. Nous formulons donc l'hypothèse d'un temps de prise instantané, c'est à dire que le sol ne conserve des propriétés de fluide qu'un temps très court après l'arrêt des vibrations.

Ceci nous a conduits à entreprendre une deuxième série de mesures en plaçant le sol au repos sur le plan et l'exposant aux ondes de façon directe en plaçant le haut parleur sous la membrane du plan incliné. Le sol s'écoule d'abord de façon fluide puis s'arrête quasi-instantanément lors de l'arrêt du haut parleur.



fig 14 : Photo du protocole du plan incliné

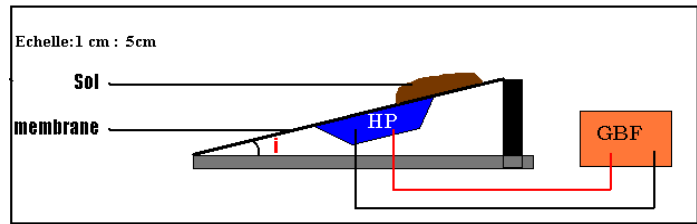


fig 15 : schéma interprétatif

3) Interprétation

L'ensemble de ces observations nous conduit à déduire que le temps de prise de notre sol est quasi-instantané (inférieur à la seconde). Il ne peut être mesuré de façon précise à l'aide d'un chronomètre avec notre dispositif. Ce résultat est confirmé par une observation sur le dispositif de la membrane vibrante: lorsque l'on met en place une fente ou un trou sur le sol et qu'on le soumet aux ondes, la fente se referme par liquéfaction du sol, ce processus de fermeture s'arrête de façon immédiate avec l'arrêt d'émission des ondes. Ces expériences, effectuées pour une teneur en eau de 20 à 26% donnent toujours le même résultat.

III-Interprétation physique et particulaire du phénomène

A) Modélisation particulaire de la thixotropie

1) Interprétation de la variation de portance du sol lors de l'exposition aux ondes.

Nous proposons l'hypothèse suivante : au repos, le sol contenant une teneur en eau donnée est porteur car les interactions au sein de la fraction colloïdale dont font partie les CAH (interactions de Van der Waals, interactions électrostatiques etc.) dues au caractère chargé des petites particules permettent la constitution d'un réseau stable. Lors de l'exposition aux ondes, l'édifice moléculaire est destabilisé et l'eau peut s'infiltrer entre les particules, diminuant ainsi la viscosité du sol. Ceci explique un changement des propriétés physiques du sol, notamment sa portance qui devient trop faible pour supporter les règles. De plus, les particules sont au départ dans une cuvette d'énergie qui permet l'existence d'une stabilité de l'édifice au niveau moléculaire grâce aux interactions. Grâce à l'énergie fournie par les vibrations, les particules sortent de cet état fondamental et l'orientation de leur champ électrostatique devient plus aléatoire : l'édifice se désorganise et acquiert un comportement fluide. Ce modèle permet aussi d'expliquer le fait que le sol puisse retrouver un comportement solide après un temps de repos.

2) Interprétation de l'influence des différents facteurs

a- Distance par rapport au centre

L'expérience montre que la thixotropie est moins importante avec l'éloignement au centre. Ceci nous laisse supposer que l'amplitude des vibrations a un rôle important dans le déroulement du phénomène sachant qu'il y a amortissement des ondes du centre à la périphérie (constatation empirique). Nous pouvons donc dire que la destabilisation de l'édifice particulaire est d'autant plus importante que l'amplitude des ondes est importante.

b- Fréquence

Les expériences montrent aussi qu'il existe des fréquences pour lesquelles le phénomène se déroule mieux que pour d'autres fréquences (tous les autres paramètres étant constants). Ceci nous conduit à émettre l'hypothèse de l'existence de fréquences de résonance pour lesquelles l'édifice se rompt plus facilement.

c- Electrolytes

i] CaSO₄ : L'ajout de CaSO₄ provoque une diminution importante de la thixotropie. Le fait que le calcium soit divalent lui permet de stabiliser une partie des particules du complexe argilo-humique du sol. Faisant partie intégrante de la fraction colloïdale, la stabilisation des CAH implique donc une diminution des interactions.

ii] NaOH : Les interactions électrostatiques qui stabilisent l'édifice au repos ne sont pas les mêmes selon le pH mais on ne connaît pas les sites susceptibles de fixer les ions Na⁺ et HO⁻ dans le sol étudié, ce qui rend difficile une interprétation plus précise. Toutefois, il est important de souligner l'importance des complexes argilo humiques dans le déterminisme du comportement mécanique du sol, et dans l'influence de l'ajout des électrolytes.

B) Modélisation macroscopique de la thixotropie : mécanique des fluides

Le sol étudié se comportant comme un liquide lorsqu'il est soumis à des contraintes particulières, nous nous proposons ici de présenter sommairement les deux modèles existant en mécanique des fluides pour caractériser un écoulement (le modèle du fluide newtonien et le modèle du fluide à seuil) et de voir s'ils sont applicables à notre sol.

Dans le cas du fluide newtonien, placé sur un plan incliné, le fluide coule jusqu'à ce qu'il reste une fine couche de fluide due à la capillarité. Ce phénomène est dû à l'existence d'une viscosité dynamique η , de ce fait il existe des contraintes empêchant l'écoulement proportionnelles au gradient de vitesse : $\tau_t = -\eta \cdot dv/dt$. Dans le cas d'un tel fluide, l'écoulement est donc quasi-total sur le plan incliné. Le sol étudié ne vérifie pas cette propriété.

Dans le cas du fluide à seuil, le matériau placé sur le plan incliné, commence à s'écouler puis, il s'arrête ensuite en un paquet qui ne peut plus s'écouler. Si on impose alors au fluide une contrainte inférieure au seuil de contrainte ou contrainte critique notée τ_c , il n'y a pas d'écoulement; si elle est supérieure, alors il y a écoulement :

Premier cas : $\tau_t < \tau_c \Rightarrow dv/dt=0$; deuxième cas : $\tau_t > \tau_c \Rightarrow \tau_t = \tau_c + f(dv/dt)$ [7-8-9]

Là encore, le sol étudié placé sur un plan incliné ne vérifie pas ce comportement : à contrainte égale ($\rho \cdot g \cdot \sin(i)$, avec ρ masse volumique du fluide, g accélération de la pesanteur et i angle d'inclinaison du plan incliné), il n'y a écoulement que lorsque le sol est soumis aux vibrations. Il faut bien noter que la présence d'ondes peut s'interpréter comme un ajout supplémentaire de contraintes qui peuvent contribuer à faire s'écouler le sol. Dans ces conditions, le sol s'écoule d'abord très rapidement et finit par s'arrêter brutalement. Si le sol avait eu le comportement d'un fluide à seuil, l'écoulement aurait été plus lent et se serait interrompu après un temps assez long (lorsque l'épaisseur du matériau n'est plus assez grande pour que la contrainte le fasse s'écouler).

C) Application à des sols connus pour leur propriétés thixotropiques : les andosols

1)Présentation

Formés à partir de sols volcaniques pyroclastiques d'âges récents, ils sont facilement identifiables à partir de leur couleur et de leur texture onctueuse particulière. L'analyse minéralogique montre que les andosols sont constitués de matières vitreuses, et de minéraux très altérables. Ils se caractérisent par un certain nombre de propriétés remarquables: une faible densité apparente, une grande capacité de rétention d'eau, une bonne stabilité des micro-agrégats conservés humides (complexes organo-humiques de quelques microns de diamètre), une propriété de deshydratation irréversible et une grande aptitude à la thixotropie. Il semble que ces propriétés soient déterminées en grande partie par la nature de la fraction colloïdale [13].

Nous avons choisi de travailler sur les andosols car ils se trouvent dans des régions climatiques variées, plus particulièrement dans des zones de volcanisme et de sismicité actifs. Il existe donc un réel danger lié au comportement thixotropique de ces sols. M. Bartoli, directeur de recherche au CNRS nous a envoyé un andosol prélevé aux Açores dont les caractéristiques sont les suivantes: Il s'agit de l'horizon 2AB qui était thixotropique sur le terrain. C'est un terreau argileux avec des graviers arrondis partiellement ou totalement érodés. La partie thixotropique présente des structures agglomérées de particules anguleuses, une structure poreuse et quelques petites racines partiellement décomposées. [14]

2)Etude expérimentale

Pour tester l'échantillon d'andosol nous avons dû adapter le premier protocole car la masse de sol à notre disposition n'était que de 1,4 kg . Si nous avions gardé la couronne de bois de 40cm, l'épaisseur de sol n'aurait pas été suffisant pour mesurer un enfoncement de 3 cm. Nous avons donc utilisé une couronne de 21 cm de diamètre. L'andosol avait une teneur en eau initiale de 35% en masse pondérale, dans cet état, il ne présentait pas de propriétés thixotropiques. Nous avons ajouté une quantité déterminée d'eau et mesuré la thixotropie de ce sol . Résultats obtenus :

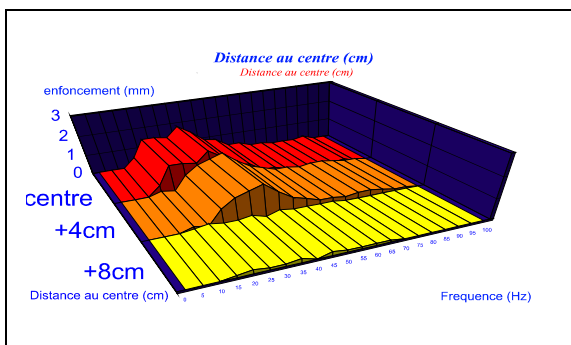


fig 16 : Teneur en eau 55%

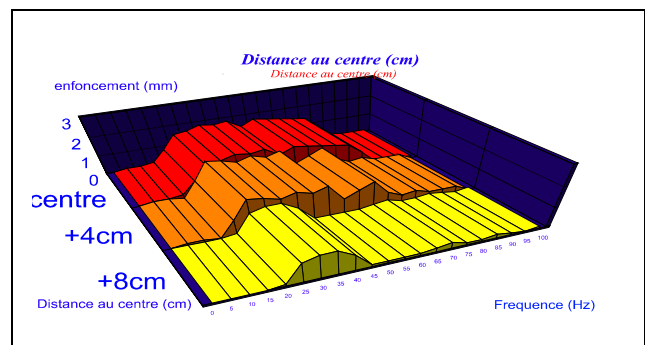


fig 17 : Teneur en eau 65%

Nous constatons des résultats comparables à ceux que nous avons obtenu sur le sol étudié à savoir une gamme de fréquence comparable: 25-50 Hz pour laquelle la thixotropie est mesurable avec les deux premières règles et pour

une teneur en eau de 55%. On constate ensuite que pour une teneur en eau supérieure (65%), la thixotropie s'étend à la troisième règlette pour des fréquences égales. On constate par ailleurs, une augmentation de la gamme de fréquence pour laquelle le phénomène se manifeste : 15-80Hz pour les deux premières règlettes et 20-45Hz pour la troisième règlette. On remarque aussi l'existence d'un plateau (enfoncement maximal égal à 1.8cm) pour les deux premières règlettes. Nous expliquons ce plateau par le fait que nous avons dû réduire l'épaisseur du sol à 1.8cm. L'enfoncement doit donc être globalement supérieur pour une teneur en eau de 65%.

CONCLUSION : Nous avons cherché à caractériser la thixotropie des sols à partir d'un exemple. Cette étude nous a conduits à déduire que ce changement de comportement mécanique particulier était influencé par différents paramètres (fréquence des vibrations, amplitude, présence d'une fraction colloïdale importante, teneur en eau, teneur en ion calcium et pH,...). Il peut s'interpréter comme un comportement fluide particulier. Ce phénomène est à l'origine de risques géologiques notables tels que les effondrements, les coulées de boues.

De façon générale, la thixotropie augmente avec la teneur en eau, l'ajout de certains électrolytes et pour certaines fréquences et amplitudes de vibrations. Il existe des sols propices à ce phénomène, la granulométrie du sol joue un rôle important dans la manifestation du phénomène : il est important de souligner le rôle des particules colloïdales (particules de taille comprise entre 0.01 μm et 1 μm) du sol dans le déterminisme du comportement mécanique. Le complexe argilo humique notamment semble intervenir de façon importante car il contient des particules chargées permettant des interactions particulières ; la présence de matière organique influe également.

Le principe du premier protocole mis en place dans ce travail a été repris par le Laboratoire de Construction des Ponts et Chaussées (LCPC) afin de tester de manière plus précise et avec des moyens plus poussés l'influence des ondes sur la thixotropie.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] M. BUISSON - Caractéristiques physiques et mécaniques des sols - 1942 - Paris Dunod (§34 p.60, §52 p.85, § 51-52 p.85)
- [2] Carte pédologique de Chartres au 1/100000° – Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France – Institut National de la Recherche Agronomique – 1981
- [3] Carte Topographique IGN Forêt de Rambouillet au 1/25000° – TOP 25 n° 2215 OT - 1995
- [4] M.PERNOT-Bulletin ABPG Géologie Bio logie 1-1992
- [5] V. ROMANOVSKY- Recherches sur les propriétés physiques des sédiments (Thèse) - Soutenue le 23/02/1946
- [6] P. COUSSOT, S. BOYER - Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plan test - Rheol Acta 34:534-543 - 1995
- [7] P. COUSSOT - The multiple yield stress of concentrated colloidal suspensions- PACS : 47.20.Ft, 82.70.D, 83.70.Hq
- [8] P. COUSSOT, JC BAUDEZ - The solid-liquid transition for colloidal pastes at a critical shear rate - PACS : 82.70.D, 83.70.Hq, 62.20.-x, 64.70.Dv
- [9] P. COUSSOT - Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids - J. Non-Newtonian Fluid Mech. - 66:55-70 - 1996
- [10] P. COUSSOT - Rhéophysique des pâtes et des suspensions - Chapitre 2 : Les suspensions molles (p. 43-99) –
- [11] D.BAIZE - Guide des analyses en pédologie; 2eme édition -INRA Editions- 2000 (p209-210)
- [12] P. DUCHAUFOR- Abrégé de pédologie; 5eme édition- Masson, Paris- 1997
- [13] P.QUANTIN-Andosols et vitrosols -Référentiel pédologique-INRA Editions-1995 (p85 à 93).
- [14] F. VAN OORT -COST 622 ACTION- Soil Resources of European Volcanic Systems -Report of the first four WG5 meetings-12 /09/2000 (pages 14 et 15).

REMERCIEMENTS à :

M.BARTOLI directeur de recherche CNRS, Centre de Pédologie Biologique CNRS, associé à l'université Nancy I.
M.COUSSOT chercheur Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil –LMSGC-(LCPC-CNRS UMR 113).
M.ISAMBERT pédologue, INRA Orléans, unité de science du sol.
Tout le corps enseignant, aux préparateurs des laboratoires de biologie, physique et chimie.